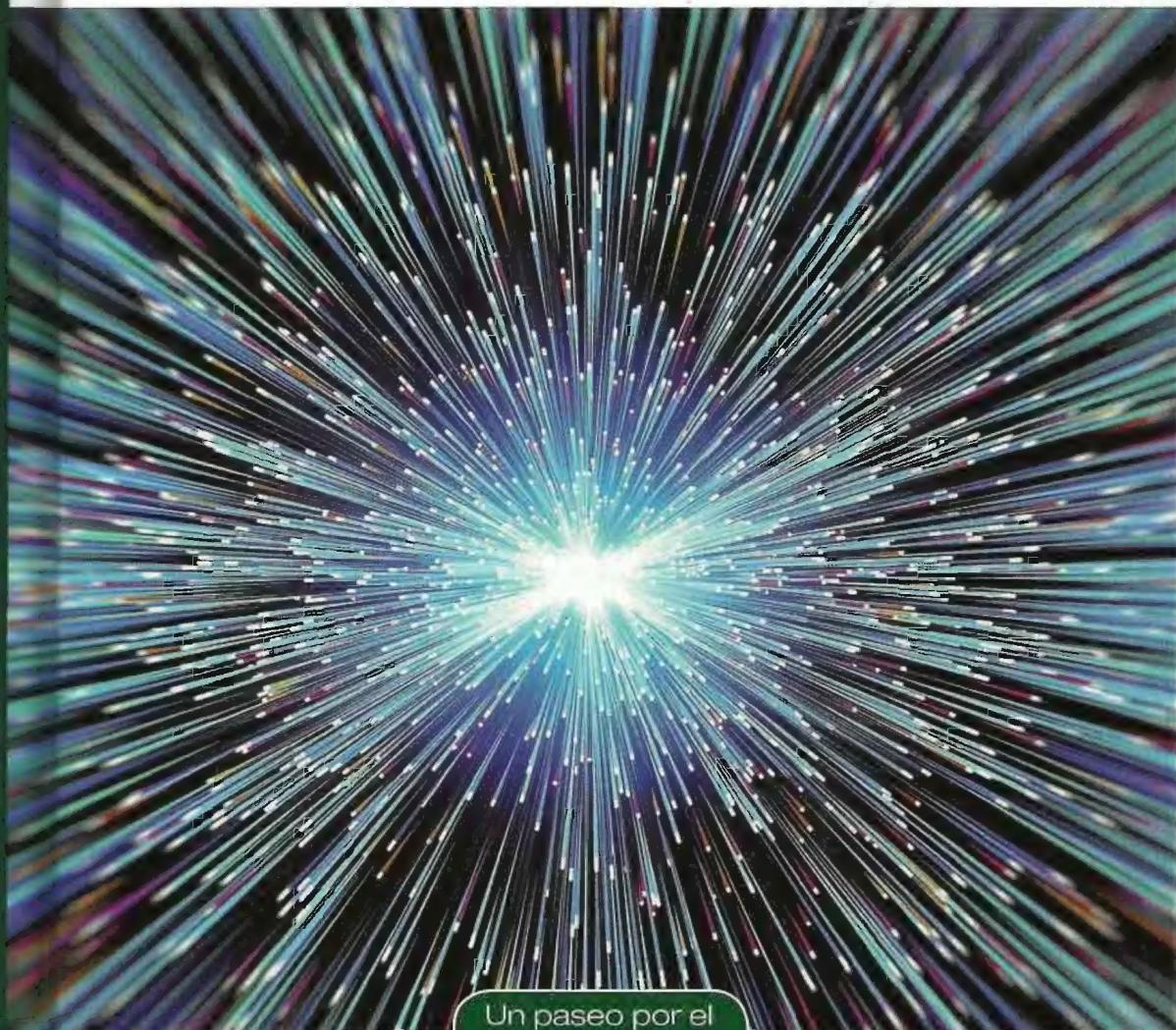


El Big Bang y el origen del universo

La teoría más ambiciosa
jamás pensada



Un paseo por el
COSMOS



The Doctor y La Comunidad

Redigiralización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

El Big Bang y el origen del universo

Un paseo por el
COSMOS

El Big Bang y el origen del universo

**La teoría más ambiciosa
jamás pensada**

RBA

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7	
CAPÍTULO 1	Del mito a la teoría	13
CAPÍTULO 2	El Big Bang matemático	49
CAPÍTULO 3	Observación: una poderosa herramienta	75
CAPÍTULO 4	La abundancia de los elementos	105
LECTURAS RECOMENDADAS		137
ÍNDICE		139

INTRODUCCIÓN

Periódicamente aparecen informaciones sobre los resultados de encuestas en las que se demanda a un cierto colectivo, más o menos extenso, su opinión sobre una cuestión particular con el fin de establecer un *ranking*, una ordenación de hechos o personas en relación a esa cuestión y de acuerdo al criterio de los entrevistados. Este tipo de ejercicios son consustanciales al ser humano, que trata de manera sistemática de resumir, en clasificaciones de esa clase, grandes volúmenes de información a fin de poder manejarlos con la máxima sencillez posible, incluso cuando ello pueda conllevar inexactitudes o injusticias.

Los científicos no son ajenos a esa ansia ordenadora y, aunque en mucha menor medida, toda vez que su integración social no es la que debiera y el interés de sus congéneres en su opinión como tales no es el que quizá sería deseable, de vez en cuando participan en consultas similares, de cuyos resultados se tiene noticia, y en las que se incluyen preguntas tales como la siguiente: ¿cuál es en su opinión el hecho científico más sobresaliente a lo largo de la historia de la ciencia?

Difícil respuesta tiene esta cuestión, dada la amplia nómina de logros que los investigadores de todas las ramas del sa-

ber han ayudado a aflorar desde el inicio de los tiempos. Pero cuando se repasa el inventario de respuestas a tal pregunta, aun cuando se haya hecho en tiempos diferentes, casi siempre aparecen dos acontecimientos que, por otro lado, tienen una relación profunda entre sí: la demostración de que el universo se expande y la detección del denominado *fondo de radiación cósmica de microondas*.

En 1929, el astrónomo estadounidense Edwin P. Hubble publicó un trabajo en el que demostraba que las galaxias alejadas de la Tierra se estaban alejando más de ella y que cuanto más alejadas estaban, más rápidamente lo hacían. La importancia de este hecho experimental fue capital, puesto que dejaba en evidencia la hipótesis de un universo estable e inmutable hasta entonces asumida por todos los cosmólogos y astrofísicos.

En 1965, los físicos estadounidenses Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, que trabajaban en los Laboratorios Bell de Holmdel en Nueva Jersey, encontraron un efecto de ruido que no podían explicar cuando analizaban la señal detectada con una antena que estaban probando para radioastronomía. El ruido se adscribió al fondo de radiación cósmica de microondas y ambos investigadores fueron galardonados con el premio Nobel de Física en 1978 por su descubrimiento, el cual fue considerado como la primera prueba irrefutable de que el Big Bang no era una simple teoría más sobre el origen del universo, sino que podría responder a lo que ocurrió en realidad al comienzo de todo.

Se trataba pues de dos hechos experimentales que tenían como causa común un mismo evento físico, el principio del universo, y que habían sido descubiertos con treinta y seis años de diferencia, una diferencia que puede parecer importante en el contexto de una vida individual, pero que no es nada si la comparamos con el tiempo que, a lo largo de la historia, la humanidad se ha pasado haciendo preguntas tales como: ¿cuándo comenzó el universo?, ¿de qué forma lo hizo?, ¿qué había antes de su creación?

Son precisamente esas preguntas clave las que trataremos de responder a lo largo de este libro. O, cuando menos, intentaremos profundizar en aquellos aspectos esenciales que puedan permitirnos esbozar explicaciones plausibles para responder

a las mismas con un mínimo fundamento científico. Esta será, pues, la tarea que nos ha de ocupar en lo que sigue: adentrarnos en la *cosmología*, la ciencia que estudia el universo, su origen, su forma y su tamaño, sin olvidarnos de las leyes físicas que rigen su devenir, ni de los elementos que lo conforman, desde los más básicos, como las partículas elementales y la radiación, hasta las enormes acumulaciones de materia que constituyen las galaxias.

En este camino hacia el principio de todo nos tropezaremos con una relevante cuadrilla de científicos y pensadores que han contribuido en más que apreciable medida a desenmarañar la intriga de cómo y cuándo surgió el universo y cuál fue su evolución. Entre otros, Einstein, Fridman, Lemaître, De Sitter, Gamow, Alpher, además de los ya mencionados Hubble, Penzias y Wilson. Todos ellos irán desfilando unidos a los acontecimientos que se vayan sucediendo a lo largo de este relato, conforme vayamos desgranando los distintos conceptos y modelos que se han ido formulando a lo largo de la historia de la ciencia con el fin de resolver el enigma. Veremos cómo teorías y experimentos fueron entrelazándose poco a poco hasta dar lugar al estado de conocimiento actual y cómo la observación, un elemento que conlleva en este contexto un más que importante cúmulo de dificultades de todo tipo, se ha erigido en la piedra de toque para verificar las distintas hipótesis.

Como no podría ser de otra forma, los «números» asociados al universo son excepcionales. Su edad estimada a día de hoy es de unos 13 800 millones de años, tres veces más que la de nuestro planeta. Su extensión se calcula en, al menos, 93 000 millones de años-luz. Como un año-luz es la distancia que la luz recorrería en el vacío si viajara durante un año seguido, esto es, unos diez billones de kilómetros, estamos hablando de un tamaño descomunal de un cuatrillón de kilómetros aproximadamente, es decir, unos 100 trillones de veces el diámetro medio terrestre, que alcanza unos modestos 12 700 km.

Por otra parte, se trata de un sistema con una densidad extremadamente minúscula, 0,1 quintillones de veces más pequeña que la densidad del agua. En la actualidad se supone que el universo está constituido por tres componentes básicos: la materia

ordinaria «observable», es decir, los átomos y las moléculas que conocemos, que suponen apenas un 5% del total de masa-energía del universo, y las denominadas como *materia y energía oscuras*, que estarían presentes en el universo en un 27% y un 68%, respectivamente, y de cuyas características, que representan uno de los desafíos de la cosmología y de la astrofísica actuales, aún no se sabe demasiado.

La observación astronómica a la que antes nos referíamos es la que da respaldo al *principio cosmológico*, una hipótesis básica en cosmología que establece que el universo es homogéneo e isótropo a escalas suficientemente grandes. Es decir, que visto a esas escalas, el universo es el mismo para cualquier observador, independientemente del punto desde donde mire y de la dirección en la que lo haga, que las leyes físicas actúan de igual modo en todos sus puntos y que la parte de él que podemos ver es una buena muestra de su totalidad.

De acuerdo con este principio, si promediamos sobre distancias del orden de unos centenares de años-luz, la materia ordinaria observable aparecería distribuida uniformemente a lo largo y ancho del universo. Sin embargo, a una escala más local, se distingue una estructura compleja en la que se observan estrellas (compuestas por muchos átomos y moléculas), galaxias (agrupaciones de estrellas), *grupos* y *cúmulos* (donde se aúnan desde unas decenas hasta varios millares de galaxias), *super-cúmulos* (en los que se acumulan varios grupos, cúmulos y galaxias aisladas) y, por fin, las inmensas *estructuras a gran escala* (tales como los *complejos de supercúmulos*, los *filamentos* y los *muros*) separadas entre sí por regiones de vacío de grandes dimensiones. Por tanto, el universo observable tendría, al menos, 100 000 millones de galaxias, conteniendo cada una entre unas decenas de millones de estrellas (en el caso de las galaxias enanas compactas) y más de 100 billones (en el caso de las galaxias gigantes), hasta alcanzar un número cercano al cuatrillón, una cantidad formidable.

Nuestra Tierra es un planeta relativamente pequeño que orbita alrededor del Sol, una modesta estrella que se ubica a unos 28 000 años-luz del centro de una galaxia espiral que tiene un

diámetro medio de unos 150 000 años-luz (un trillón y medio de kilómetros), que se piensa que podría albergar hasta 400 000 millones de estrellas y que se conoce con el nombre de Vía Láctea. Como muchos otros en astronomía, este nombre proviene de la mitología griega en la que el origen de la galaxia se atribuía a Hera: esta, al darse cuenta de que Heracles (hijo ilegítimo de su esposo Zeus y de Alcmena, una mortal hija del rey Electrón de Micenas) trataba de mamar de su pecho con el fin de alcanzar la deidad, lo apartó con desdén, derramando la leche y formando la galaxia.

La Vía Láctea forma parte del denominado Grupo Local de galaxias en el que aparece como la segunda en tamaño y brillantez, solo superada por Andrómeda. Estas dos, junto con la del Triángulo, son las tres galaxias gigantes que conforman el Grupo Local, alrededor de las cuales orbitan hasta una treintena de galaxias más pequeñas. El Grupo Local se encuentra próximo al cúmulo de Virgo (a unos 60 millones de años-luz de nosotros) y ambos forman parte del supercúmulo de Lainakea (los «cielos incommensurables» en hawaiano), una estructura compuesta por unas 100 000 galaxias que pertenece, a su vez, al filamento de Piscis-Cetus, una estructura a gran escala de unos 1 000 millones de años-luz de largo y 150 millones de ancho, compuesto por unos 60 supercúmulos.

Pero no es esto todo. A 200 millones de años-luz encontramos la Gran Muralla, una superestructura de unos 500 millones de años-luz de largo, 300 de ancho y 15 de espesor. Algo más alejada, a 1 000 millones de años-luz, se sitúa la gran muralla Sloan, otra superestructura de unos 1 400 millones de años-luz de longitud. Y aún más retirada, a unos 10 000 millones de años-luz, aparece la gran muralla de Hércules-Corona Boreal. A estas estructuras hay que añadir los dos grandes grupos de quásares: Huge, de 4 000 millones de años-luz de dimensión transversal, y Clowes-Campusano, algo más pequeño, con un tamaño de 2 000 millones de años-luz, ambos situados a unos 10 000 millones de años-luz de distancia.

Todo este inmenso sistema surgió, de acuerdo a lo que hoy día establece la mejor de las teorías de que disponemos al respecto,

el Big Bang, de una *singularidad*, un «algo» infinitamente pequeño, denso y caliente. ¿Por qué apareció esa singularidad? No lo sabemos. ¿Cómo y de dónde se generó? No lo sabemos. ¿Qué había antes de ella? Tampoco lo sabemos. De hecho, es posible que no tenga siquiera sentido plantear preguntas como estas toda vez que antes de ese instante podría no haber existido nada.

La teoría del Big Bang trata de explicar lo que ocurrió desde ese instante inicial. Aquí vamos a repasar los acontecimientos que llevaron a su establecimiento como la visión que mejor describe nuestro estado actual de conocimiento respecto al origen del universo.

Del mito a la teoría

El origen del universo ha preocupado siempre al ser humano, lo que ha dado pie a preguntas tan fundamentales como: ¿por qué existe el universo?, ¿qué leyes rigen su evolución? El largo trayecto recorrido hasta las teorías físicas que las responden constituye una de las tareas intelectuales más sobresalientes durante el devenir de la ciencia.

«Al principio Dios creó el cielo y la tierra.» Así de parco y a la vez contundente comienza el *Génesis*, el primero de los cuarenta y seis libros que conforman el Antiguo Testamento de la Biblia. Seguidamente relata cómo Dios prosigue con su obra y hace aparecer la luz, el primer día; el firmamento, el segundo; los continentes separados de los mares, con los pastos, las hierbas y los árboles frutales, el tercero; el Sol, la Luna y las estrellas, el cuarto; los cetáceos y el resto de los animales marinos y las aves, el quinto, y los animales domésticos, los reptiles, las fieras, el hombre y la mujer el sexto. Una vez que el cielo, la tierra y todo el universo habían quedado concluidos, descansó al día siguiente.

No por ser, en nuestro entorno, quizá el mejor conocido, este relato sobre el origen del universo es único. De hecho, en todas las culturas es posible encontrar narraciones míticas del mismo o similar estilo. El físico inglés Stephen Hawking (1942), en un breve ensayo titulado *El origen del universo*, menciona al gran dios Bumba que, según la tradición de los boshongo (un pueblo centroafricano), un buen día en que se encontraba aquejado de un fuerte dolor de estómago, vomitó el Sol, la Luna, las estrellas, algunos animales y, finalmente, el hombre.

Por su parte, Hesíodo, poeta griego de alrededor del año 700 a.C., describe en su *Teogonía* el origen del cosmos con la ineludible presencia de los dioses: Caos, Gea, Tártaro y Eros, de los que nacen Érebo (las tinieblas) y Nyx (la noche) que, a su vez, dan origen a Éter y Hemera (las luces celeste y terrestre). Gea da a luz a Urano (el cielo estrellado), a las Montañas, a las Ninfas y al Ponto (el piélago estéril). Urano y Gea engendran a los Titanes y las Titánidas (los lagos y los mares), como Océano, Hiperión y Tetis, a Cronos y a los Cíclopes. Y de todos ellos desciende el resto de los dioses y los hombres.

A pesar de la dosis de, tal vez, ingenuidad que estos relatos parecen dejar entrever, no cabe duda de que el ansia del ser humano por conocer cómo se originó el universo y cómo ha evolucionado desde entonces hasta nuestros días ha sido una constante en la ciencia y en la filosofía desde bien al principio.

DE ARISTÓTELES A NEWTON

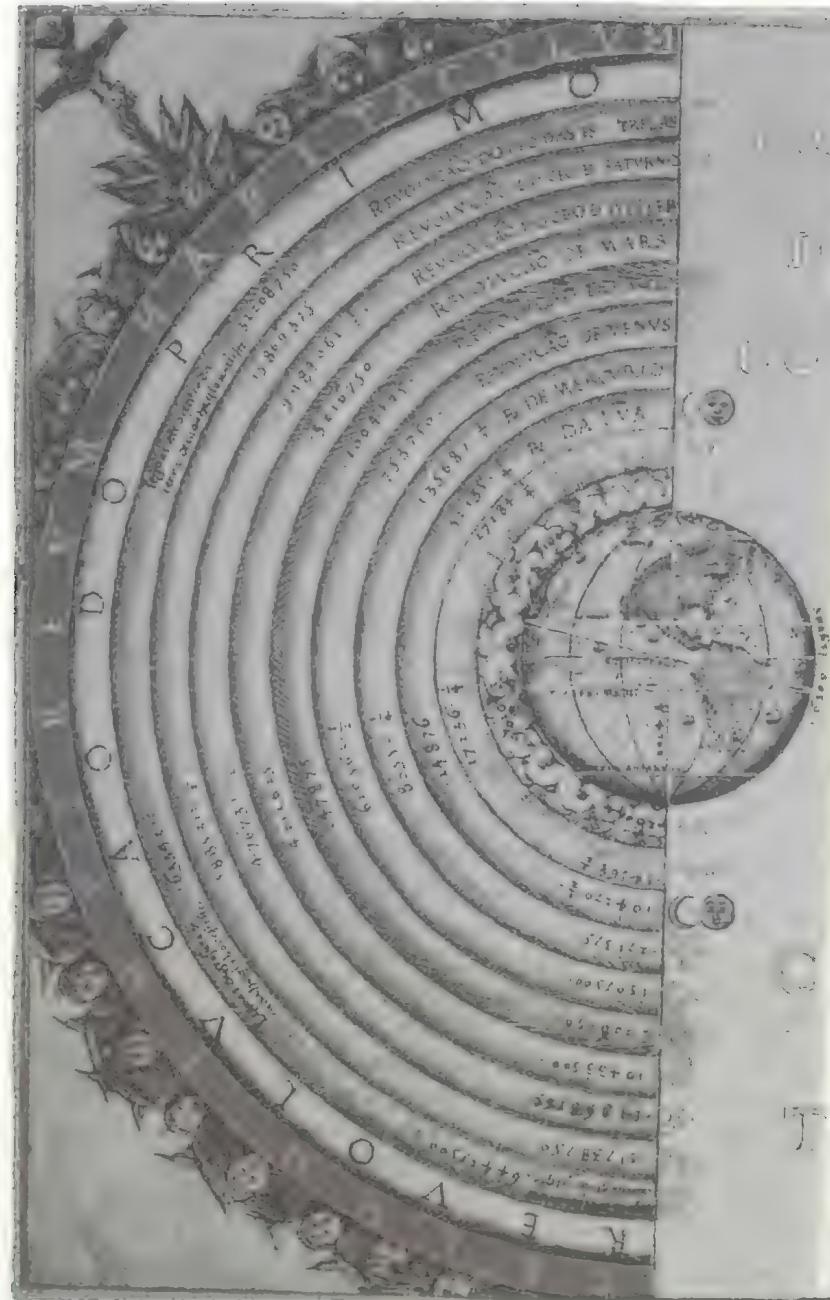
San Agustín (354-430) había nacido en Tagaste (hoy Souk Ahras, Argelia) y se convirtió al cristianismo en 385. Muy interesado en la literatura y la filosofía, realizó relevantes aportaciones en el ámbito científico. Así, aseveró que «el universo y el tiempo surgieron a la vez». En palabras del gran físico-matemático inglés Roger Penrose (1931): «Sin duda, una intuición genial», que se adelantaba más de mil quinientos años a Einstein y su teoría de la relatividad. El propio san Agustín estableció que la creación del universo ocurrió unos 5 000 años a.C., fecha que algunos investigadores han relacionado con la finalización de la última glaciaciación y la aparición masiva del *Homo sapiens*.

Contrastaba esta estimación de san Agustín con la teoría imperante entonces: el universo aristotélico, eterno en el tiempo. Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.) ha sido posiblemente el filósofo griego con mayor influencia en el mundo occidental. Lejos de circunscribirse al ámbito filosófico, desarrolló teorías básicas en distintas disciplinas científicas como la biología, la botánica, la zoología y la astrofísica.

En el modelo de Aristóteles, el universo era finito y esférico, compuesto por varias capas concéntricas sucesivas y con la Tierra en el centro, estática y, también, esférica. Aristóteles dividía el universo en dos regiones: la *sublunar*, que abarcaba todo lo que existía por debajo de la Luna, sin incluirla, es decir, el mundo terrestre, y la *supralunar*, en la que se encontrarían los planetas entonces conocidos (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno), la propia Luna, el Sol y las estrellas. En la primera, nada de lo que sucedía podía formularse en términos matemáticos, dada la variedad existente en ella y el cambio continuo al que estaba sometida. Todo giraba en torno a la naturaleza que resultaba ser intrínsecamente diversa. Aunque, eso sí, todos los cuerpos presentes en esa región estaban constituidos por cuatro elementos fundamentales: tierra, agua, aire y fuego. Cada uno de ellos, de acuerdo a su *gravedad específica*, trataba de ocupar su «lugar de reposo natural»: la tierra, el centro de la Tierra; el agua, a continuación sobre aquella; por encima de ambas, el aire, y por último, el fuego, el más ligero de los elementos, cuya tendencia era moverse hacia el confín de la región. Los movimientos de los distintos cuerpos existentes en la zona sublunar estaban por tanto relacionados con las cantidades de los cuatro elementos fundamentales que los constituyan.

Por el contrario, la región supralunar estaba dotada de una armonía de movimientos en el marco de un ordenamiento donde los cambios eran absolutamente regulares y predecibles. Esferas concéntricas de éter, único elemento fundamental en esta región, tenían incrustados los objetos celestes: estos se movían alrededor de ciertas posiciones establecidas, mientras que aquellas giraban en torno al centro del universo gracias a la acción de «motores inmóviles». El universo así constituido era el todo: no existía un «espacio» que lo albergara o, en otras palabras, las preguntas «¿qué hay más allá del universo?» o «¿dónde está situado el universo?» no eran preguntas legítimas.

Además, Aristóteles creía que el universo siempre había existido tal cual se conocía y siempre existiría con la misma estructura. Alejaba de esta manera la idea de creación, en su opinión, mucho menos perfecta que la de eternidad. Entre las objeciones





Universo aristotélico en una ilustración confeccionada por el cartógrafo portugués Bartolomeu Velho en el siglo xvi. Según el modelo de Aristóteles, el universo, finito, constaba de varias capas concéntricas sucesivas alrededor de la Tierra, y no experimentaba cambios.

planteadas a esa existencia eterna estaba el nivel de progreso alcanzado por la humanidad y el reconocimiento de los sucesivos logros que se habían ido desarrollando con el paso del tiempo. Este argumento fue uno de los que posteriormente utilizó san Agustín para establecer la fecha a la que antes nos hemos referido. Sin embargo, Aristóteles y otros filósofos griegos pensaban que los humanos, como el universo, siempre habían existido y hacían responsables a las catástrofes naturales de los varios retrocesos que en ese progreso habrían debido ocurrir en el pasado.

Cuatrocientos años más tarde, este modelo aristotélico del universo fue reformulado por Claudio Ptolomeo (ca. 100-ca. 170), un ciudadano romano nacido en Egipto, que vivió en Alejandría y que realizó más que importantes aportaciones en distintas áreas científicas. De ellas cabe destacar su *Geografía*, en la que plasmó todo el conocimiento del mundo grecorromano en esa disciplina, el tratado de astrología conocido como *Tetrabiblos*, que continuaba enseñándose en muchas universidades europeas durante el siglo xvii, y el *Almagesto*, una enciclopedia de astronomía en la que discutió los movimientos de los planetas y las estrellas. Originalmente titulado *Sintaxis matemática*, fue posteriormente denominado *El gran tratado*. El libro se conservó gracias a los árabes y de ahí su nombre.

El modelo de Ptolomeo mantenía la estructura básica del de Aristóteles. Se trataba pues de un modelo geocéntrico, con la Tierra esférica e inmóvil en el centro del universo y todos los planetas y estrellas orbitando alrededor de ella gracias al movimiento de las distintas esferas concéntricas en las que se integraban. Pero Ptolomeo fue mucho más allá que Aristóteles y fue capaz de llevar a cabo un detallado análisis matemático de los movimientos celestes, conjuntando para ello algunos conceptos que habían sido introducidos con antelación por otros astrónomos griegos, como los *epiciclos* y los *deferentes*, con la proposición del *ecuante*, un punto de referencia alternativo que permitía explicar los cambios aparentes de velocidad que se observaban en las trayectorias de los planetas.

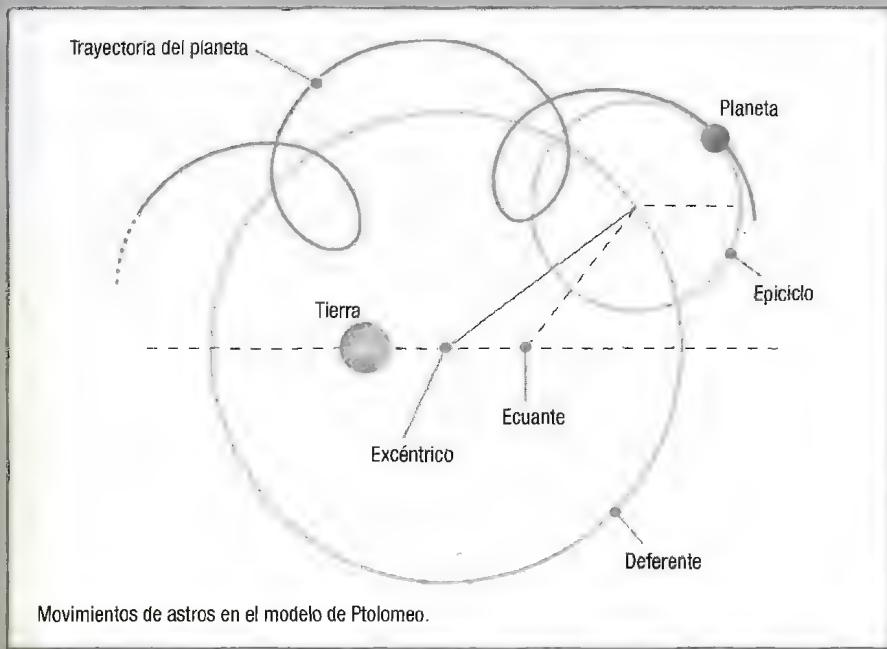
El impacto científico de la obra de Ptolomeo fue extraordinario, no solo como tratado de astronomía, sino porque permitió

EL UNIVERSO DE PTOLEMEO

El avance fundamental que Claudio Ptolomeo logró al establecer su modelo de universo fue que consiguió una determinación mucho más precisa de las posiciones de los objetos celestes. Ptolomeo asumía la teoría geocéntrica de Aristóteles, pero incorporando los conceptos de *epíciclo*, *deferente* y *excéntrico*, que habían sido utilizados por los astrónomos griegos durante siglos.

Los movimientos de los planetas

Como muestra la figura, un planeta dado gira en una trayectoria circular conocida como *epíciclo*. El centro de esa trayectoria se mueve sobre una circunferencia, el *deferente*, cuyo centro es el *excéntrico*. Ambas rotaciones tienen sentido horario y sus planos son casi paralelos a la *eclíptica* (la trayectoria aparente del Sol en la esfera celeste). La Tierra no se encontraría pues en el centro exacto de las órbitas planetarias sino algo desplazada, una corrección aceptada por el geocentrismo al verse solo como un ajuste para mejorar la precisión en el posicionamiento de los planetas. Ptolomeo introdujo además el *ecuante*, un punto situado a igual distancia que la Tierra del *excéntrico*, pero al otro lado. Un observador ubicado en el *ecuante* vería el centro del *epíciclo* moverse con velocidad angular constante. Este punto era fundamental para explicar el cambio en la velocidad aparente del movimiento de los planetas.

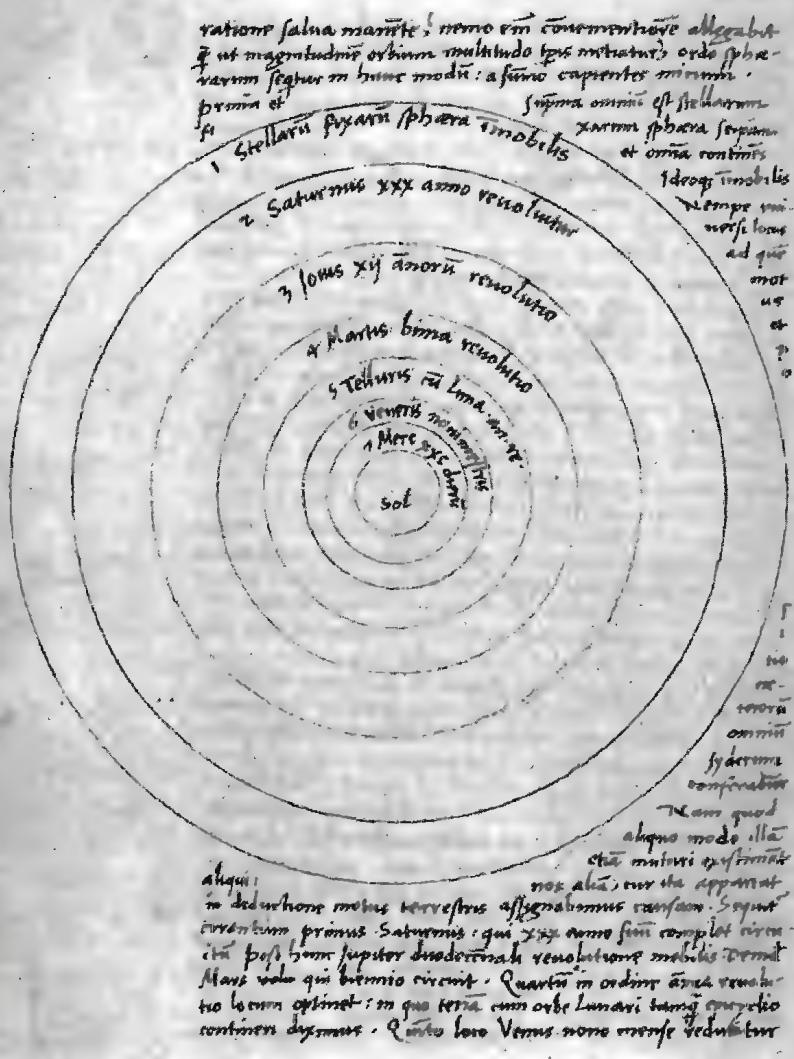


saber de los conocimientos desarrollados por antiguos matemáticos griegos cuyo trabajo se había perdido con el paso del tiempo. Por poner un ejemplo, cabe mencionar que casi todo lo que se conoce sobre la obra del gran matemático Hiparco de Nicea (190 a.C.-120 a.C.) es a través del *Almagesto*. El tratado de Ptolomeo rigió la astronomía desde su publicación hasta el principio del Renacimiento, en los mundos bizantino, árabe y europeo medievales.

Tuvieron que pasar muchos años para que la visión aristotélica del universo cambiara en lo fundamental de la mano del astrónomo y matemático polaco Nicolás Copérnico (1473-1543). En el mismo año de su fallecimiento, un discípulo suyo, Georg Rheticus (1514-1574), publicó su libro *De revolutionibus orbium coelestium* (*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*), en el que Copérnico había trabajado durante más de treinta años y que constituyó uno de los hitos iniciales de lo que se dio en llamar la *Revolución científica*, acaecida durante los siglos XVI y XVII y que completarían Galileo y Newton, entre otros muchos.

Copérnico analizó con detalle la información experimental disponible, realizó sus propias observaciones y comprendió que para describir los movimientos celestes de una manera mucho más sencilla bastaba con cambiar el sistema de referencia. Como conclusión postuló que el centro del universo se encontraba en el Sol, alrededor del cual orbitaban los planetas, mientras que las estrellas, situadas a una distancia mucho mayor que la que separaba la Tierra del Sol, permanecían fijas (véase la imagen de la página contigua). La hipótesis no era, sin embargo, completamente novedosa ya que, primero, el matemático y filósofo griego Filolao, discípulo de Pitágoras, en el siglo IV a.C., y, más tarde, el astrónomo griego Aristarco de Samos, en el siglo III a.C., y Seleuco de Seleucia, en el siglo I a.C., habrían defendido modelos del universo cuyo centro no estaba en la Tierra.

Copérnico mantuvo, no obstante, la estructura de esferas concéntricas del modelo de Aristóteles y Ptolomeo, esferas en las que se circunscribía el movimiento de cada uno de los planetas, que él supuso que seguían círculos perfectos, siendo la más externa de todas ellas la que contenía a las estrellas fijas. Por



Universo copernicano, en el que el Sol ocupa el centro del mismo, mientras que la Tierra se sitúa tres órbitas más allá con el nombre de *Tellus* (este era el nombre en latín de la Tierra; *Telluris* es el genitivo). Este esquema aparece en la página 18 del manuscrito original de *De revolutionibus orbium coelestium*, que se conserva en la biblioteca de la Universidad Jagellónica de Cracovia, la antigua Academia de Cracovia.

su parte, la Luna orbitaba alrededor de la Tierra en su propia esfera.

Pero no por obvio, dados sus resultados, el modelo heliocéntrico fue aceptado y no todo fueron parabienes, como puso de manifiesto el teólogo alemán Martín Lutero (1483-1546), padre de la Reforma protestante, quien después de haberle llegado rumores acerca de la nueva visión cosmológica de Copérnico aseveró: «La gente presta oídos a un advenedizo astrólogo que se esfuerza en demostrar que la Tierra da vueltas, no los cielos o el firmamento, el Sol y la Luna [...] Este loco desea revertir la totalidad de la ciencia de la astronomía; pero la Sagrada Escritura nos dice que Josué mandó al Sol detenerse, y no a la Tierra».

A pesar de todas las restricciones, algunas de ellas por cuestiones puramente filosóficas, que Copérnico introdujo en su modelo del universo, y aunque sus predicciones sobre las posiciones de los planetas y los astros no eran mucho mejores que las que proporcionaba el modelo de Ptolomeo, su hipótesis heliocéntrica sentó las bases de los cambios científicos que estaban por llegar (no solo en la astronomía).

Fueron necesarios no obstante setenta años para que dos figuras preeminentes de la ciencia hicieran su aparición: el astrónomo y físico italiano Galileo Galilei (1564-1642) y el astrónomo y matemático alemán Johannes Kepler (1571-1630). Durante el lustro de 1615 a 1620 estos dos científicos establecieron experimentalmente los fundamentos de la nueva astronomía y desecharon de manera definitiva el universo geocéntrico de Aristóteles. Galileo escribió en 1615 su famosa *Carta a la Gran Duquesa Cristina*, en la que intentó acomodar la teoría de Copérnico a la doctrina católica imperante, tratando de demostrar y de convencer a los lectores de que el heliocentrismo no podía entenderse como contrario a las Sagradas Escrituras. Galileo no consiguió su propósito y fue conminado por el cardenal e inquisidor Roberto Bellarmino a «abstenerse completamente de enseñar o defender esa doctrina u opinión o de discutirla [...] a abandonarla por completo [...] la opinión de que el Sol permanece en el centro del mundo y que la Tierra se mueve». A pesar de ello, en 1618, la Iglesia aceptó una versión modificada de la

tesis de Copérnico, pero solo para realizar cálculos relacionados con el calendario.

A partir de 1617, Kepler comenzó a publicar su tratado *Epitome astronomiae copernicanae*. En él exponía su modelo heliocéntrico, que estaba basado en las que hoy se conocen como *leyes de Kepler* y en el que la principal novedad era que los planetas orbitaban alrededor del Sol siguiendo órbitas elípticas, lo que permitía alcanzar una mayor precisión a la hora de determinar su posición en el cielo. Galileo no supo del trabajo de Kepler, que, sin embargo, ganó popularidad con el paso del tiempo de forma tal que, hacia finales del siglo XVII eran muchos los ciudadanos comunes que lo conocían y discutían acerca de sus implicaciones y consecuencias.

El punto álgido de esta parte de la carrera científica acaeció cuando el físico y matemático inglés Isaac Newton (1643-1727) publicó su famoso libro *Philosophiae naturalis principia mathematica* en 1687. Entre otras leyes básicas de la física, Newton estableció en él la de la *gravitación universal*, que permitió dar una explicación físico-matemática de las leyes de Kepler: la fuerza de la gravedad, la misma que explicaba cómo caían los graves (cuerpos con movimiento naturalmente acelerado, en caída libre) en la Tierra, era también la responsable del movimiento de los objetos celestes. Más allá de fundamentar el modelo heliocéntrico, Newton argüía que era el centro de gravedad común al Sol y a todos los planetas lo que cabía considerar como el «centro del mundo». Además, y como aplicación directa de sus leyes de la mecánica, Newton podía demostrar que ese punto debía o bien estar en reposo o bien moverse con velocidad constante en línea recta, si bien por razones de sentido común pensaba que la primera era la mejor alternativa.

Hasta bien entrado el siglo XVIII, todos los libros que defendían la visión heliocéntrica del universo estuvieron incluidos en el *Índice de Libros Prohibidos* por la Iglesia católica que, por otro lado, no había dejado de prestar ayuda para que se realizaran observaciones astronómicas desde las torres de sus iglesias y

Platón es mi amigo, Aristóteles es mi amigo, pero mi mejor amiga es la verdad.

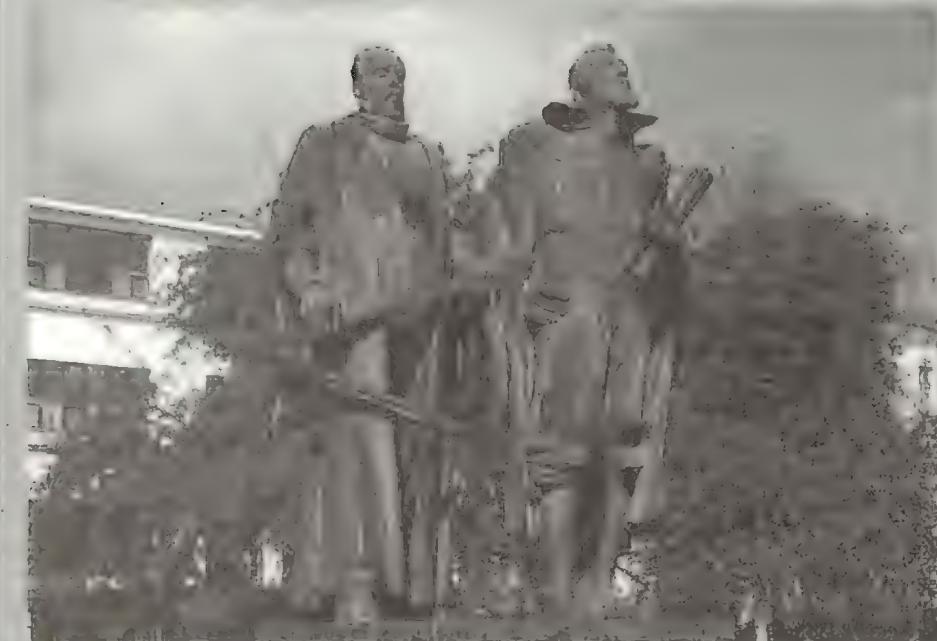
ISAAC NEWTON

LAS LEYES DE KEPLER

Johannes Kepler colaboró con el danés Tycho Brahe (1546-1601), aunque al parecer no siempre medió entre ellos una buena relación. Brahe disponía de la base de datos astronómicos más completa de su tiempo, pero no permitió a Kepler acceder a ella y solo cuando aquel falleció pudo este utilizarla para sus investigaciones. Las leyes que llevan su nombre aparecieron en 1609, en su libro *Astronomía nova* (las dos primeras leyes); y en 1619, en su tratado *Harmonices mundi* (la tercera). El enunciado de las leyes es el siguiente:

Primera ley de Kepler

Los planetas se desplazan describiendo trayectorias elípticas en torno al Sol, que se sitúa en uno de los focos de la elipse. En general las elipses de los planetas del sistema solar son muy poco excéntricas, es decir, que se alejan muy poco de la trayectoria circular. Por ejemplo, la Tierra dista del Sol 147 millones de kilómetros en el *perihelio* (mínima distancia respecto a él) y 152 en el *afelio* (máxima distancia respecto al Sol). Por su parte, Mercurio sigue la órbita más excéntrica de todos los planetas, con distancias al Sol de 46 y 70 millones de kilómetros en los puntos de máximo acercamiento y máximo alejamiento, respectivamente.



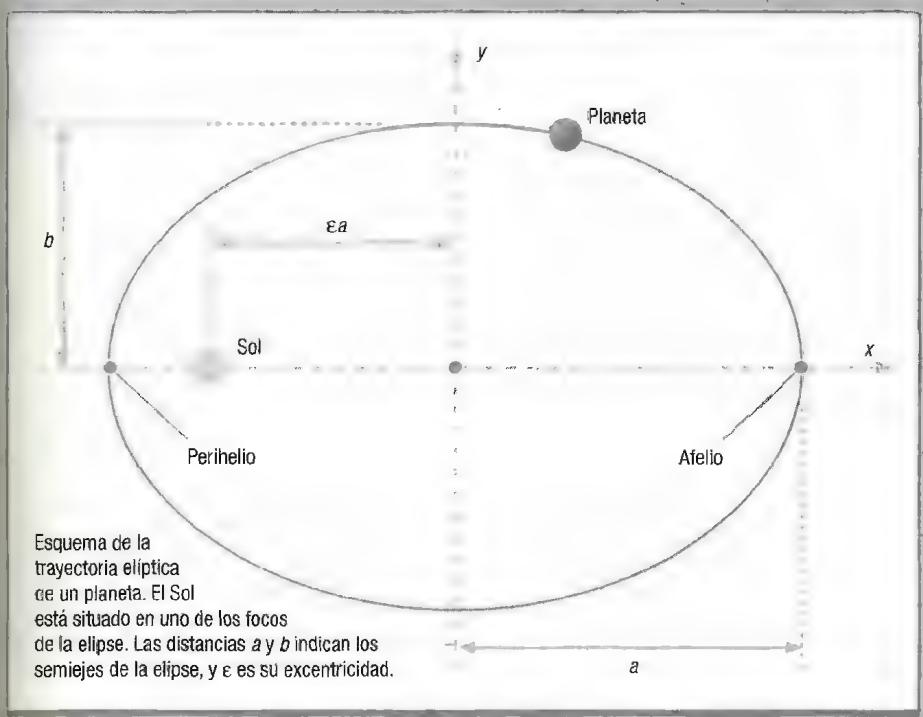
Monumento a Tycho Brahe (izquierda) y Johannes Kepler, creado por el escultor Josef Vajce, y emplazado en Praga, República Checa.

Segunda ley de Kepler

Las áreas barridas por el *radio vector* (que es el segmento que une el Sol con el planeta) son proporcionales a los tiempos empleados para describirlas. Si las órbitas fueran perfectamente circulares, la velocidad del planeta sería constante, pero como no es así, los planetas se mueven más rápido en el perihelio que en el afelio. Por ejemplo, la velocidad de la Tierra es de casi 31 km/s en el primero y de menos de 29 km/s en el segundo.

Tercera ley de Kepler

El cuadrado del tiempo que cada planeta tarda en completar una vuelta alrededor del Sol es proporcional al cubo del semieje mayor de su trayectoria (a en la figura). Esta ley es relevante porque conocida la distancia de la Tierra al Sol y su periodo de revolución alrededor de este (1 año), podemos calcular las distancias entre el Sol y los restantes planetas sin más que determinar, mediante observación, el tiempo que tardan en completar una vuelta a su alrededor. Las velocidades orbitales medias de Saturno, la Tierra y Mercurio son, aproximadamente, 10, 30 y 48 km/s.



catedrales a fin de mantener los datos necesarios para el establecimiento de un calendario ajustado.

LAS ANTINOMIAS DE KANT

Copérnico, Galileo, Kepler y Newton habían obrado el primer paso certero hacia el entendimiento del universo, pero aún quedaba un largo trayecto por recorrer. Resuelto razonablemente el problema «local» del sistema solar, era preciso abordar el porqué del comportamiento de las estrellas fijas. Ya el propio Newton había reflexionado sobre el hecho de que su teoría de la gravitación universal no parecía capaz de dar una explicación convincente de la cuestión, sobre todo una vez que se empezaba a asumir que esas estrellas lejanas debían tener, esencialmente, las mismas características que el Sol. La fuerza de la gravedad es de carácter atractivo y, por tanto, Newton entendió enseguida que las estrellas, en tanto que entes materiales, debían atraerse entre sí. El universo no podía ser, por consiguiente, un sistema estable y en reposo.

Sin embargo, las hipótesis admitidas entonces consideraban que, independientemente de que el universo hubiera existido de forma indefinida o hubiese sido creado en algún momento pasado, su aspecto no había cambiado significativamente y se había mantenido en todo momento tal y como se observaba entonces. Para tratar de explicar este extremo algunos astrónomos formularon la hipótesis de que la gravedad se tornaría en fuerza repulsiva a grandes distancias, estableciéndose de este modo un ten con ten de la atracción entre estrellas cercanas y la repulsión entre las lejanas y produciéndose una suerte de equilibrio que daría lugar a lo que la observación nos muestra. Sin embargo, formulando de esa manera, ese hipotético equilibrio resultaría inestable y cualquier aproximación o alejamiento adicional entre grupos de estrellas llevaría a su ruptura, dando lugar a un aglutinamiento o una dispersión indefinida de los mismos.

¿Había tenido el universo un principio? ¿Se trataba de un sistema esencialmente estático? Preguntas como estas no fue-

LAS LEYES DE NEWTON

Las leyes empíricas deducidas por Kepler a partir de los datos astronómicos que tenía disponibles, pueden obtenerse como aplicación directa de las leyes de Newton (las tres *leyes de la mecánica* y la *ley de la gravitación universal*) al problema del sistema solar. Las tres leyes fundamentales de la mecánica son:

Primera ley de Newton

Si sobre un cuerpo no actúa ninguna fuerza externa a él, mantiene su estado de movimiento permaneciendo en reposo o moviéndose con velocidad constante y aceleración nula.

Segunda ley de Newton

Si sobre un cuerpo actúa una fuerza externa a él, sufrirá una aceleración cuya dirección y sentido serán los mismos que los de la fuerza aplicada, y cuya magnitud será la de la fuerza dividida por la masa del cuerpo.

Tercera ley de Newton

Si un cuerpo ejerce sobre otro una fuerza dada, el segundo ejercerá sobre el primero otra fuerza que tendrá las mismas magnitud y dirección que la primera y sentido contrario al de aquella.

La ley de la gravitación universal

Además de estas tres leyes fundamentales de la mecánica, Isaac Newton enunció la ley de la gravitación universal que nos dice que toda pareja de cuerpos con masas dadas se atraen entre sí con una fuerza que es directamente proporcional al producto de las masas de ambos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. La constante de proporcionalidad, cuyo valor es $G = 6.67384 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$, se conoce como constante de gravitación universal y pone de manifiesto que esa atracción entre los cuerpos es, en general, muy débil. No obstante, sí que se observa claramente, por ejemplo, cuando dejamos caer un objeto desde una cierta altura, ya que en ese caso la distancia entre la Tierra y él es relativamente pequeña y la masa de la Tierra es muy grande. Esta misma fuerza de atracción permite también explicar por qué los planetas orbitan alrededor del Sol y por qué esas órbitas son elípticas.



Retrato de Isaac Newton pintado hacia 1715-1720.

Dos cosas llenan el ánimo de admiración y respeto, siempre nuevos y crecientes cuanto más reiterada y persistentemente se ocupa de ellas la reflexión: el cielo estrellado que está sobre mí y la ley moral que hay en mí.

IMMANUEL KANT

Immanuel Kant (1724-1804) quien, en su *Crítica de la razón pura*, publicada en 1781, una de las obras que más impacto ha tenido en la filosofía moderna, formuló lo que él denominó *antinomias*, cada una de ellas formada por una *tesis* y una *antítesis*:

1. «El mundo tuvo un comienzo en el tiempo y está limitado en el espacio» o «El mundo es infinito tanto en el tiempo como en el espacio».
2. «Todas las sustancias que existen en el mundo son simples o están compuestas de partes simples» o «En el mundo ninguna sustancia tiene partes simples».
3. «Los fenómenos que suceden en el mundo no pueden explicarse exclusivamente con leyes de la naturaleza» o «Cuarto ocurre en el mundo está sujeto a leyes de la naturaleza y por tanto no hay libertad».
4. «En el mundo existe un ser absolutamente necesario que es parte o causa del mismo» o «No hay en el mundo, o fuera de él, ningún ser absolutamente necesario».

Kant opinaba que las tesis estaban relacionadas con el racionalismo, mientras que las antítesis eran más propias del empirismo. En cualquier caso, la característica distintiva de estas

ron, sin embargo, las únicas que se plantearon, ya que también se empezó a especular sobre cuáles podrían ser las dimensiones reales del universo. Estos dilemas comenzaron a ser objeto de análisis desde distintos puntos de vista y algunas de las discusiones más interesantes vinieron desde el mundo de la filosofía. Uno de los personajes más destacados en este sentido fue el filósofo prusiano

antinomias era que no podían argüirse argumentos racionales que pudieran invalidar solo una de las dos proposiciones; o dicho de otra manera: ambos asertos podían ser defendidos con razonamientos perfectamente válidos. Por ejemplo, en relación a la primera, que es la que está directamente relacionada con el tema que nos ocupa, Kant indicaba que tanto si el universo había tenido un principio como si no, siempre habría existido un tiempo infinito anterior a cualquier acontecimiento, incluido el propio inicio del universo, sin que hubiera razón alguna para que ese acontecimiento hubiese sucedido en un instante particular. Suponía por tanto Kant la «existencia» indefinida del tiempo, que podía extenderse hacia atrás tanto como fuera necesario, algo que contrastaba con la aseveración de san Agustín a la que nos hemos referido anteriormente.

LA PARADOJA DE OLBERS

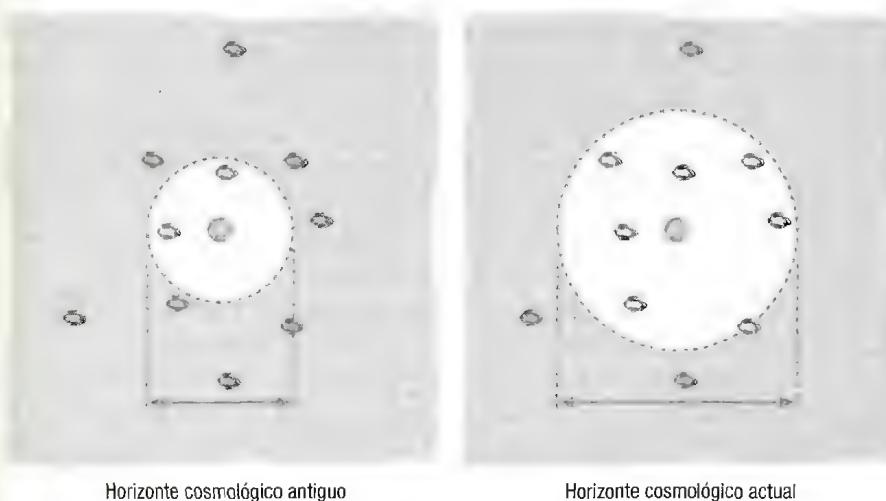
El problema del tamaño y la edad del universo fue objeto de análisis por parte de otros muchos astrónomos. Una de las discusiones más interesantes ocurrida entonces fue la denominada *paradoja del cielo nocturno oscuro* según la cual el hecho de que el cielo nocturno sea oscuro es una evidencia contra un universo infinito, estático, indefinido en el tiempo y poblado por un número infinito de estrellas. Si el universo fuera así, es decir, en las condiciones del modelo que, con varias modificaciones, se había mantenido desde los tiempos de Kepler, cualquier línea de visión desde la Tierra terminaría en una estrella y entonces el cielo aparecería brillante, incluso de noche. Esta aparentemente ingenua objeción se conoce también como *paradoja de Olbers*. Dicha paradoja debe su nombre al médico y astrónomo aficionado de origen alemán Heinrich Olbers (1758-1840), quien la planteó en 1823. A Olbers se le atribuyen también varios descubrimientos de asteroides y cometas.

No fue Olbers, sin embargo, el primero en poner de manifiesto la objeción y en adelantar posibles explicaciones a la misma. El astrónomo y matemático inglés Thomas Digges (ca. 1546-

1595) argumentó en 1576 que las estrellas lejanas eran apenas visibles y de ahí la oscuridad del cielo nocturno. Kepler, en 1610, habló de un muro cósmico oscuro en el que acababa el universo que ni era infinito, ni contenía infinitas estrellas. Un argumento similar fue propuesto en 1672 por Otto von Guericke (1602-1686), un físico y jurista alemán. En 1720, el astrónomo y matemático inglés Edmond Halley (1656-1742) asumió que el universo estaba formado por capas esféricas concéntricas, de igual anchura, en las que se encontrarían distribuidas las estrellas. Tras demostrar que esas capas producían la misma cantidad de luz, independientemente de su radio, se percató de que si admitía un universo infinito, el cielo debería estar siempre iluminado, por lo que concluyó que las estrellas próximas obstruirían la luz proveniente de las más lejanas, una explicación que no resolvía el problema ya que cualquier línea de visión hacia el cielo seguiría acabando en una estrella. El astrónomo suizo Jean-Philippe de Chéseaux (1718-1751) propuso en 1744 que entre algunas de las estrellas y nosotros se interponían nubes de materia que absorbían la luz proveniente de aquellas. Sin embargo, en tal caso, la temperatura de esas nubes habría ido incrementándose con el tiempo hasta ser tan brillantes como las propias estrellas.

Curiosamente, fue el escritor estadounidense Edgar Allan Poe (1809-1849) en su obra *Eureka*, publicada en 1848, el que planteó una solución en la que se esbozaban argumentos correctos: la luz de algunas de las estrellas, especialmente las más lejanas, no habría alcanzado aún la Tierra dado que se desplaza con una velocidad finita y que, además, el universo debía tener una edad también finita (figura 1). Esta misma tesis fue defendida en 1861 por el astrónomo alemán Johann von Mädler (1794-1874). La resolución de la paradoja necesitó de mucho tiempo y en ella participaron, primero, el físico e ingeniero británico lord Kelvin (1824-1907), en 1901, y más tarde el cosmólogo estadounidense Edward Harrison (1919-2007), en 1961. Pero no fue hasta 1987 cuando la solución definitiva fue establecida, ya que se hizo necesario conocer otras cuestiones fundamentales del origen y la evolución del universo.

FIG. 1



Horizonte cosmológico antiguo

Horizonte cosmológico actual

Conforme transcurre el tiempo, más se amplía el horizonte cosmológico o porción del universo a nuestro alrededor desde la cual puede llegar a nosotros la eventual luz emitida tantos años atrás como años-luz de distancia nos separan del emisor. De manera simplificada, podemos imaginar el horizonte cosmológico como una superficie esférica que aumenta de tamaño conforme transcurre el tiempo y en cuyo centro está la Tierra. No podemos ver nada que esté situado fuera de la esfera. Tomando como referencia unas pocas galaxias, el horizonte cosmológico actual (derecha) ya es lo bastante grande como para que veamos seis y estemos comenzando a ver una séptima. En cambio, en un pasado remoto (izquierda) la esfera era mucho más pequeña y solo habríamos podido ver dos galaxias. A esto habría que añadir el hecho de que casi todas las galaxias se alejan de la Tierra a medida que pasa el tiempo.

LA HIPÓTESIS NEBULAR Y EL UNIVERSO ISLA

En el año 1755, Kant publicó un libro titulado *Historia natural universal y teoría de los cielos*, que supuso otro hito en la evolución de la visión del universo. Según Kant las estrellas y los planetas se habrían formado a partir de nubes gaseosas (las nebulosas de hoy día) que se encontrarían rotando lentamente y que habrían colapsado por acción de la atracción gravitatoria. La idea no era entonces nueva, puesto que veinte años antes, en 1734, el científico y teólogo sueco Emanuel Swedenborg (1688-1772) ya

había avanzado la hipótesis en su libro *Principia rerum naturalium*. Posteriormente, y de forma al parecer independiente, el físico y matemático francés Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) discutió en 1796 una hipótesis similar en su *Exposición del sistema del mundo*. El modelo, desarrollado para explicar la formación de nuestro sistema solar y sin ninguna base experimental, podría considerarse razonablemente acertado a la luz de lo que se conoce en la actualidad, e incluso sería aplicable a otros sistemas similares. Sin embargo, en su momento no pudo explicar algunos problemas fundamentales relacionados con la distribución del momento angular en el sistema solar, con lo que, poco a poco, el modelo fue cayendo en el olvido.

Es interesante señalar en este punto que Laplace había sido uno de los primeros científicos en plantearse el problema de la estabilidad a largo plazo del sistema solar. Su propósito era bien ambicioso: «ofrecer una solución completa al gran problema de la mecánica que representa el sistema solar y llevar la teoría a coincidir tan estrechamente con la observación que las ecuaciones empíricas no encontrarán más lugar en las tablas astronómicas». Y el resultado fue su *Mecánica celeste*, un enciclopédico trabajo en cinco volúmenes en los que discutió desde un punto de vista analítico la dinámica del Sol y los planetas. No solo esto sino que fue de los primeros en conjeturar la posibilidad de la existencia de los agujeros negros y también avanzó la hipótesis de que algunas de las nebulosas que empezaron a descubrirse con la ayuda de los cada vez más potentes telescopios se encontrarían en realidad fuera de la Vía Láctea.

Laplace creía en el determinismo causal en relación a los hechos observados en la naturaleza. Sobre la dinámica del universo indicó: «Debemos pues ver el estado presente del universo como el efecto de su estado anterior y como la causa del que le va a seguir. Un intelecto que, para un instante dado, conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza y las posiciones respectivas de los seres que la componen, si después fuera bastante vasto como para someter estos datos al análisis, podría incluir en una misma fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero: nada sería

incierto para él y el futuro, así como el pasado, estarían presentes ante sus ojos».

Entonces, ¿en quién estaba pensando cuando hablaba de ese *intelecto superior*? La verdad es que no estaba claro. Algunos historiadores de la ciencia han considerado plausible que pudiera referirse a Dios ya que Laplace no era ateo. Sin embargo, se cuenta de él que cuando presentó a Napoleón Bonaparte la primera edición de su libro *Exposición del sistema del mundo*, este le espetó: «Newton ha hablado de Dios en su libro. Yo he recorrido el suyo y no he encontrado ese nombre ni una sola vez». Por su parte, Laplace no tuvo problema en responderle: «Ciudadano primer Cónsul, yo no he tenido necesidad de tal hipótesis». A diferencia de Newton, que había reconocido que determinadas perturbaciones seculares observadas en el sistema solar habrían producido su destrucción a largo plazo y que, por tanto, se había visto obligado a introducir la intervención divina para evitarlo, Laplace había resuelto el problema utilizando las herramientas de análisis matemático que él mismo había desarrollado y no necesitó inmiscuir a Dios en el asunto.

En el mismo libro que hemos citado antes, Kant hizo uso de un término relevante: el *universo isla*, precursor de las actuales galaxias. El Sol sería únicamente una estrella como tantas otras en la Vía Láctea y esta no sería más que una galaxia independiente de otras muchas que deberían existir en el universo. También Swedenborg había planteado una idea similar en sus *Principia*. Pero un poco antes que Kant, en 1750, Thomas Wright (1711-1786), un astrónomo y matemático inglés, había esbozado esencialmente la misma teoría en su libro *Una teoría original o nueva hipótesis del universo*, en el que, además, explicó la razón de la apariencia que tiene la Vía Láctea para un observador terrestre (debido a que nuestro punto de vista corresponde a mirar el plano central de una capa relativamente estrecha de estrellas) y especuló sobre el hecho de que las nebulosas apenas visibles no serían sino galaxias extremadamente distantes, situadas fuera de la Vía Láctea. Sin duda, una propuesta, esta última, cuyas extraordinarias implicaciones tardarían en ser asimiladas por la comunidad astronómica en todo el mundo.

LA OBSERVACIÓN ENTRA EN JUEGO

Hasta el momento en el que se establecieron las teorías que hemos descrito anteriormente, la observación había sido bastante escasa y la información de la que se tenía justificación experimental era casi inexistente. Apenas si se conocía con una cierta precisión la distancia a la Luna y al Sol. Eso hacía que todas las teorías que sobre el universo se habían ido estableciendo se habían formulado desde premisas más bien especulativas.

Aunque algunos astrónomos como Wright, que fue el primero en hacerlo, habían apelado a la necesidad de la observación para poder empezar a dilucidar si los modelos que se habían formulado eran válidos o no, tuvieron que pasar algunos años aún para que la astronomía observational comenzara a dar sus primeros frutos.

Y no fue hasta finales del siglo XVIII cuando se empezaron a establecer estimaciones de la escala y de la estructura del universo apoyadas en una base cuantitativa. Los primeros intentos en esta dirección hay que atribuirlselos al astrónomo británico de origen alemán Frederick William Herschel. Constructor de sus propios telescopios, se dedicó entre otras cuestiones a observar el universo profundo, tratando de dar soporte a la teoría del universo isla. Durante la segunda mitad del siglo XVIII, identificó más de 2000 nebulosas, pero no fue capaz de resolver suficientemente las estrellas que las conformaban para poder establecer límites a la Vía Láctea. Concluyó pues, erróneamente, que las nebulosas que había observado eran pequeñas comparadas con nuestra galaxia y que, en realidad, formaban parte de esta.

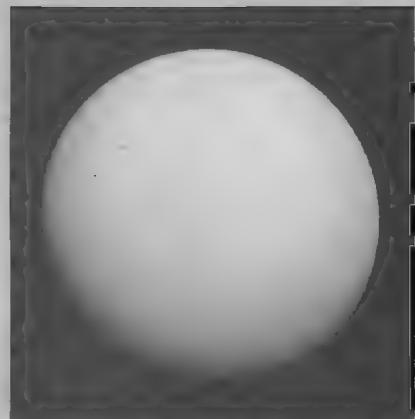
Las primeras medidas de distancias a estrellas basadas en la *paralaje* no se llevaron a cabo hasta finales de la década de 1830, cuando los astrónomos alemanes Friedrich Bessel (1784-1846), también un afamado matemático, y Friedrich von Struve (1793-1864), y el matemático y astrónomo escocés Thomas Henderson (1798-1844), utilizaron esa técnica para determinar distancias entre el sistema solar y las estrellas 61 Cygni, Vega y Alfa Centauri (ilustrada en la página contigua), respectivamente.



El sistema estelar de Alfa Centauri (Alpha Centauri o Alfa Centauro), es el más cercano a la Tierra. Esto ayudó en el siglo xx a que se pudiera calcular su distancia a la Tierra mediante paralaje. La imagen fue captada por el Observatorio Europeo Austral en el marco del proyecto DSS2.

FREDERICK WILLIAM HERSCHEL

Herschel (1738-1822) fue un astrónomo británico, nacido en Hannover, que emigró a Gran Bretaña cuando contaba diecinueve años de edad. Su padre lo envió allí junto con su hermano Jakob tras la batalla de Hastedbeck, en la que el ejército de Hannover, en cuya banda de música militaban los tres, fue derrotado por los franceses durante la Guerra de los Siete Años. Su hermana pequeña Caroline L. Herschel (1750-1848) también tuvo una destacada carrera como astrónoma, colaborando con él, y fue la primera científica que se hizo merecedora a la medalla de oro de la Real Sociedad Astronómica por sus aportaciones en el campo de la astronomía observacional.



El planeta Urano, descubierto por Herschel en 1781.

De la música a la astronomía

Herschel fue un compositor de cierto renombre y tocaba varios instrumentos. Su interés por la astronomía surgió a partir de su amistad con Nevil Maskelyne (1732-1811), astrónomo real británico. Constructor de sus propios telescopios de reflexión, se interesó en un principio por la búsqueda de sistemas estelares dobles o múltiples de los que descubrió un buen número que catalogó en varios informes presentados a la Royal Society de Londres a partir de 1782. Fue el descubridor de Urano (1781) y de dos lunas suyas (Oberón y Titania, 1787), y de otras dos de Saturno (Mimas y Encélado, 1789). También mejoró la medida del período de rotación de Marte y descubrió que sus casquetes polares sufren variaciones estacionales.

La génesis del gran catálogo

A partir de 1782 y utilizando dos telescopios de 610 cm de distancia focal y 30 y 47 cm de apertura, junto con su primer telescopio (2,1 m y 16 cm), se dedicó a estudiar los objetos situados en el cielo profundo y descubrió unas 2400 galaxias (entonces denominadas nebulosas) cuyas características publicó en tres catálogos aparecidos a partir de 1786. Su hijo, John F. W. Herschel (1792-1871), añadió a los objetos reseñados por su padre los que su tía había observado y los suyos propios y publicó en 1864 su *Catálogo general de nebulosas y cúmulos*. Este catálogo fue la base del *Nuevo Catálogo General* en el que John Dreyer (1852-1926), un astrónomo irlandés, de origen danés, compiló toda la información de los Herschel junto con la que había ido apareciendo a lo largo del siglo xix, en total 7 840 objetos estelares. El acrónimo inglés de este catálogo, NGC (de *New General Catalogue*), se sigue utilizando hoy día para la identificación de esos objetos. En 1800 Herschel descubrió la radiación infrarroja en la luz solar, haciendo pasar esta por un prisma y disponiendo un termómetro en la zona del espectro más allá del color rojo. Fue nombrado sir en 1816 y murió en 1822 en su casa de Slough.

Algún tiempo después, en 1845, el astrónomo irlandés William Parsons (1800-1867), tercer conde de Rosse, construyó el telescopio de reflexión de mayor apertura del mundo (1,8 m) hasta bien entrado el siglo xx, y con él pudo resolver estrellas individuales pertenecientes a varias nebulosas. Fue capaz, además, de identificar el carácter espiral de algunas de ellas.

Un hito importante en la astronomía observacional lo marcó el británico William Huggins (1824-1910), que fue el primero en utilizar un espectroscopio. En 1864 obtuvo las líneas del espectro de emisión de la nebulosa NGC 6543 (véase la imagen de la página 41) y un espectro continuo con líneas de absorción de la nebulosa de Andrómeda. Esto permitió clasificar las nebulosas en dos grandes grupos: las formadas por nubes de gas luminoso y las constituidas por la agregación de estrellas (tipo al que pertenecían todas las nebulosas espirales conocidas entonces).

En 1895 se construyó el último gran *telescopio de refracción*: el Yerkes. Tenía una lente de un metro de diámetro y fue financiado por Charles Yerkes (1837-1905), un magnate de Chicago de dudosa honestidad, y construido por el astrónomo estadounidense George Hale (1868-1938). Pero para entonces ya habían empezado a producirse los dos cambios fundamentales que llevarían la astronomía extragaláctica a la situación actual. El primero fue el uso sistemático de la fotografía para obtener imágenes astronómicas, y el segundo, el abandono de los telescopios de refracción en favor de los *reflectores*. Estos últimos eran mucho más compactos y permitían visualizar áreas mayores. No todo eran, sin embargo, ventajas, y así, estos telescopios presentaban más complicaciones en lo referente al seguimiento de los objetos a observar. Con todo, poco a poco, se fueron resolviendo las dificultades mediante distintas técnicas que fueron desarrollándose con la intervención de un buen número de astrónomos entre los que cabe destacar a los estadounidenses Lewis Rutherfurd, John Draper, inglés de nacimiento, George Carver y el inglés Andrew Common.

A finales del siglo xix se contaba ya con la tecnología necesaria para obtener excelentes fotografías de las nebulosas tal y como lo atestiguan los trabajos del irlandés Isaac Roberts y, sobre todo,

los del estadounidense James Keeler (1857-1900), que trabajó en el observatorio de Lick, el observatorio más antiguo del mundo situado en la cima de una montaña (el Monte Hamilton, en California) y que sigue estando en funcionamiento hoy día. Allí contaron con el telescopio Crossley, un reflector de 91 cm de apertura que había sido construido en Gran Bretaña por Common y que fue vendido posteriormente a Edward Crossley, un hombre de negocios inglés y astrónomo aficionado que acabó donándolo a Lick. Keeler obtuvo imágenes de una claridad sin precedentes y, sobre todo, pudo deducir que si el tamaño de algunas de las nebulosas observadas era similar al de Andrómeda (M31), debían encontrarse a distancias enormes de la Tierra.

Después de construir el telescopio Yerkes, Hale fue nombrado director del observatorio de Monte Wilson, situado en California, donde construyó, en primer lugar, una versión más grande del reflector Crossley (de 1,5 m de apertura) y, más adelante, otra aún mayor, de 2,5 m, que fue financiada por el filántropo estadounidense John Hooker y que contó con el apoyo económico de otro industrial estadounidense: Andrew Carnegie (1835-1919). Este último, en una visita a Monte Wilson sentenció: «El señor Hale ha descubierto aquí 1 600 mundos alrededor de estrellas que no eran conocidas antes. Hemos encontrado helio en el Sol y, después de encontrarlo allí, lo hemos encontrado en la Tierra. Todo ello demuestra que todas las cosas tienen un origen común».

Los dos grandes telescopios que construyó Hale tuvieron un papel preponderante en la astronomía de los siguientes decenios.

LA TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD

En 1915 el rumbo de la cosmología cambió definitivamente. De hecho muchos investigadores piensan que esa disciplina nació precisamente ese año, cuando Albert Einstein (1879-1955) publicó su artículo en el que formulaba su *teoría general de la relatividad*, esa teoría que iguala espacio y tiempo y que establece



La nebulosa NGC 6543, conocida como Ojo de Gato, en una imagen captada por el telescopio espacial Hubble. Se originó cuando la estrella central, parecida a nuestro Sol, expulsó sus capas más externas. Esas capas de gas y polvo son las principales responsables de las estructuras en forma de anillo. El proceso de formación de las estructuras más intrincadas y espectaculares, en el centro, aún no se ha esclarecido.

MIDIENDO LAS DISTANCIAS A LAS ESTRELLAS

La medida de la distancia a las estrellas fue un problema que interesó a los astrónomos desde que se inventaron los telescopios. Sin embargo, no fue hasta principios del siglo xix cuando la tecnología estuvo lo suficientemente desarrollada como para poder llevar a cabo la tarea con resultados más o menos fiables. El primero que lo consiguió fue el alemán Friedrich Bessel, que en 1838 anunció que la estrella 61 Cygni, que había observado durante más de un año, presentaba un *ángulo de paralaje* de 0,314 segundos de arco y que, por lo tanto, distaba del sistema solar unos 10,3 años-luz. La medida actualizada de esa distancia es de 11,36 años-luz por lo que el error en la determinación de Bessel era inferior al 10%. Un más que notable resultado, por tanto.

El método de la paralaje

La técnica que uso Bessel para realizar su medición se conoce como *paralaje*. La paralaje no es más que la variación angular de la posición aparente de un objeto cuando se mira desde dos puntos de vista diferentes. El ejemplo más sencillo de este efecto es mirar un objeto, cerrando alternativamente uno de los ojos, y comparar su posición aparente con otro objeto más alejado (para el que no se observa cambio alguno). En el caso de las estrellas, la situación es la que se describe en la figura de la página siguiente. Supongamos una estrella (relativamente cercana) cuya distancia al Sol queremos determinar. Si la observamos desde la Tierra en dos instantes del año separados por seis meses veremos que, respecto al conjunto de estrellas muy distantes (y que, por tanto, parecen estar fijas en el fondo celeste), la estrella ocupará dos posiciones aparentes distintas. El ángulo que forma una de las dos líneas visuales de la estrella (en uno de esos dos instantes) con la línea que une la estrella y el Sol es el *ángulo de paralaje*. Como se ve en la figura, el triángulo que delimitan la Tierra, el Sol y la estrella en un momento determinado es un triángulo rectángulo por lo que si se mide el ángulo de paralaje, p , la distancia del Sol a la estrella vale $D = d/\operatorname{tg} p$, siendo d la distancia de la Tierra al Sol.

Ángulos diminutos

Hoy día se dispone de información detallada sobre la posición de las estrellas fijas y, por tanto, determinar los ángulos de paralaje es relativamente simple. Sin embargo, en el pasado no era una tarea sencilla. Estamos hablando de ángulos que no superan el segundo de arco y que disminuyen a medida que la estrella de interés está más alejada. Bessel utilizó en su día un *heliómetro*, un aparato diseñado para medir con exactitud diámetros de astros. Muy posiblemente realizará la medida determinando el ángulo formado por la línea vertical que mira desde la Tierra al céntro y la visual a la estrella (que coincide con el ángulo de paralaje). Tardó 18 meses, por lo que pudo llevar a cabo dos medidas desde cada posición.

Nace el pársec

La paralaje dio lugar a una nueva unidad de distancia astronómica: un objeto tal que su ángulo de paralaje sea de 1 segundo de arco estará a una distancia de 1 pársec, es decir, a 3,26 años-luz.

Astrometría desde el espacio

Evidentemente, la paralaje está limitada por la precisión en la determinación del ángulo de paralaje ya que cuanto mayor sea la distancia a la estrella menor será dicho ángulo. El satélite Hiparcos (Hipparcos), de la Agencia Espacial Europea (ESA), lanzado en 1989 y en funcionamiento hasta 1993, obtuvo paralajes con una precisión del milisegundo de arco ($1/3\,600\,000$ de grado), lo que permitió determinar distancias de hasta unos pocos cientos de pársecs. Una de las cámaras del telescopio espacial Hubble (lanzado en 1990 y aun operativo), la WFC3, permite alcanzar precisiones del orden de unos 20-40 microsegundos de arco y, por tanto, medir con fiabilidad distancias de hasta 5 000 pársecs.

Si observamos desde la Tierra una estrella cercana con un intervalo de seis meses, por ejemplo en junio y en diciembre, percibiremos su cambio de posición aparente con respecto al fondo fijo de estrellas lejanas. El ángulo que forma una de las dos líneas visuales de la estrella con la línea que une la estrella y el Sol es el ángulo de paralaje, p .



que los efectos atractivos de la gravedad producen distorsiones y deformaciones del que desde entonces se ha dado en llamar el *espacio-tiempo*.

Mucho se ha escrito sobre esta teoría que, a diferencia de otras, trascendió en su día a la propia comunidad científica y dio a su autor una fama en el ámbito de la sociedad en general que no había tenido hasta entonces parangón y que posiblemente no lo haya tenido después. Por su parte, Einstein reconoció enseguida la potencialidad de su teoría y ya en 1917 escribió que por primera vez disponía de un marco teórico que le permitía abordar de manera completa el problema de construir modelos del universo como un todo.

Einstein se sentía cómodo con un universo estático. De hecho no tenía ninguna razón para pensar de otra manera ya que no había ningún hecho experimental que indicara otra cosa. Y tal y como había dicho el matemático ruso Nikolái Lobachevski (1792-1856): «No hay otro medio que las observaciones astronómicas para juzgar la exactitud adjunta a los cálculos de la geometría ordinaria». Lobachevski e, independientemente, el matemático húngaro János Bolyai (1802-1860) habían desarrollado en 1825 las primeras geometrías hiperbólicas (no euclídeas) que luego resultaron ser fundamentales para la teoría de la relatividad. Esos trabajos permitieron al matemático alemán Bernhard Riemann (1826-1866) desarrollar las geometrías que llevan su nombre y que fueron las que el matemático Marcel Grossmann (1878-1936), amigo de Einstein, hizo notar a este para resolver uno de los problemas básicos de la teoría de la relatividad. Grossmann alertó a Einstein del carácter no lineal de las geometrías riemannianas, pero precisamente esa era la característica esencial que él buscaba para su teoría.

Sin embargo, había un problema que ya había sido puesto de manifiesto por el propio Newton: un universo estático sería inestable debido a la atracción gravitatoria. Como solución Einstein introdujo en su ecuación un término repulsivo caracterizado por la denominada *constante cosmológica*, Λ . De esta manera consiguió disponer de una distribución de materia casi estática, que era precisamente lo que buscaba. De resultas el universo

de Einstein era además cerrado, con secciones cuyo radio de curvatura venía dado por $R_0 = 1/\sqrt{\Lambda}$, esto es, unos 10^9 años-luz. En cualquier caso, los efectos de Λ solo serían relevantes a escalas cosmológicas, siendo despreciable su influencia a escalas del orden del tamaño de nuestro sistema solar. Por otro lado la constante cosmológica, a diferencia de lo que ocurre con la gravedad, no dependía de la densidad local de materia.

Einstein pensó que de esta manera había conseguido resolver una segunda cuestión que le interesaba especialmente: incorporar de manera natural en su teoría lo que él denominaba el *principio de Mach*. Esta era una hipótesis que al parecer había sido enunciada en 1893 por el físico alemán Ernst Mach (1838-1916) y que podría resumirse diciendo que la inercia de un sistema se debe a su interacción con el resto de sistemas del universo de manera que cada partícula presente en él afecta a todas las demás partículas del mismo. En términos más técnicos referidos a la teoría de la relatividad podría decirse que la distribución de materia del universo considerada a gran escala determina los sistemas de referencia inerciales que se definen a escala local (en mecánica clásica, todo sistema de referencia en el que es válida la primera ley de Newton se denomina *inercial*). Pues bien, Einstein creyó que no había soluciones estáticas para sus ecuaciones de campo en ausencia de materia, lo que automáticamente implicaría que su teoría debía satisfacer el principio de Mach. Sin embargo, esto no era así y, en 1917, el matemático y físico holandés Willem De Sitter (1872-1934) demostró que sí existían soluciones en el caso de que no hubiera materia presente en el universo.

De todas formas, la teoría de la relatividad fue confirmada exitosamente en diversas situaciones. La primera de ellas fue la explicación de la denominada *precesión del perihelio de Mercurio*. Kepler había determinado empíricamente que las órbitas de los planetas alrededor del Sol eran elipses. Este tipo de trayectorias se deduce sin más que tener en cuenta las leyes de Newton y la ley de la gravitación universal enunciada por él, pero siempre que consideremos que solo están presentes el Sol y el planeta en cuestión. Sin embargo, la órbita de cada planeta



Fotografía del eclipse solar del 29 de mayo de 1919 realizada por Arthur Eddington.

es influenciada por los demás planetas debido a la atracción gravitatoria que se ejercen mutuamente. El matemático francés Urbain Le Verrier (1811-1877) observó una anomalía en Mercurio: la posición del perihelio de su órbita difería en unas decenas de segundo de arco por siglo de la que se obtenía aplicando las leyes de la mecánica clásica. Le Verrier propuso en 1859 que ello podría deberse a la presencia de un anillo de corpúsculos materiales entre Mercurio y el Sol o quizás a un nuevo planeta, al que llamó Vulcano. Ni que decir tiene que ni uno ni otro fueron nunca descubiertos y hubo que esperar a que el propio Einstein realizará un cálculo del efecto observado en el marco de la teoría general de la relatividad para poder explicarlo de manera exacta. La modificación del espacio-tiempo producida por un cuerpo muy masivo como es el Sol, da lugar a un efecto del que la mecánica newtoniana no podía dar cuenta. Un efecto que, por otro lado, solo se podía observar dada la proximidad de Mercurio al Sol.

La segunda de las confirmaciones de la teoría de la relatividad la proporcionó el astrofísico británico Arthur Eddington (1882-1944), quien en 1919 realizó una expedición a la isla de Príncipe para observar el eclipse solar que ocurrió el 29 de mayo de aquel año. Confrontando las fotografías obtenidas durante el eclipse con otras de la misma región del cielo estando el Sol suficientemente alejado, pudieron comprobar que la posición de algunas estrellas estaba ligeramente desplazada y que el desplazamiento era el que predecía la teoría de la relatividad según la cual los rayos de luz provenientes de esas estrellas serían desviados por la deformación del espacio-tiempo producida por la presencia del Sol.

La cosmología se podía dar por tanto como iniciada y comenzaba el complejo camino hacia la explicación de cómo, cuándo y por qué había nacido nuestro universo.

El Big Bang matemático

Aunque la confirmación del Big Bang como el modelo que mejor explica el origen del universo tuvo que esperar hasta la acumulación de un conjunto de observaciones experimentales que fueron surgiendo desde la década de 1920, sus primeras visualizaciones vinieron del campo de la matemática gracias a un análisis detallado de las ecuaciones de la relatividad general.

En 1922 apareció publicado en la revista alemana *Zeitschrift für Physik* un artículo titulado «Sobre la curvatura del espacio». Su autor, un físico-matemático ruso que trabajaba en el Observatorio Geofísico de Petrogrado, demostraba que las ecuaciones originales de la relatividad general tenían soluciones homogéneas e isótropas cuya característica esencial era la de no ser estáticas. Einstein reaccionó mostrando su oposición y argumentó que esas soluciones que daban lugar a un universo no estacionario no verificaban las ecuaciones de campo de su teoría. El investigador ruso envió a Einstein una carta en la que explicaba todos los detalles de sus cálculos y en la que, al final, le instaba a hacer una rectificación ante la revista en caso de estar de acuerdo con sus argumentaciones. Einstein no contestó a la carta, ni puso tampoco enmienda alguna a sus comentarios, probablemente porque en ese periodo se encontraba de viaje por el mundo. Pero en mayo de 1923 Yuri Krutkov, un profesor de la Universidad de Petrogrado, coincidió con Einstein en Leiden (Holanda) y le insistió acerca de los detalles del trabajo de su compatriota. Convencido Einstein de la validez de esas soluciones dinámicas para la estructura del espacio, admitió su error y escribió a

Zeitschrift für Physik una nota de rectificación, si bien muchos historiadores de la ciencia piensan que siguió creyendo que esas soluciones no podían existir en la realidad.

LOS MODELOS DE FRIDMAN

El personaje ruso al que nos hemos referido era Alexander (Aleksandr) Fridman, fallecido prematuramente víctima de fiebres tifoideas, poco después de publicar, en la misma revista, un segundo trabajo que completaba su análisis de las ecuaciones de la relatividad general y que versaba «Sobre la posibilidad de un mundo con curvatura negativa constante del espacio». Lo que Fridman demostró en los dos artículos mencionados es que el radio de curvatura del universo podía ser una función, o bien creciente, o bien decreciente con el tiempo, o bien periódica. La magnitud fundamental que controla una u otra solución es la densidad media de materia en el universo, ρ_0 . Fridman encontró que si esa densidad media era superior a un cierto valor crítico, $\rho_{\text{crítica}}$, el universo sería cerrado, su geometría respondería a la de una superficie esférica, con curvatura positiva, y su tamaño sería, por tanto, finito. Este universo se expandiría de manera cada vez más lenta hasta que, en un momento dado, empezaría a contraerse.

Si ρ_0 no supera la densidad crítica, estaríamos ante un universo abierto, con una geometría similar a la de una «silla de montar» y curvatura negativa, cuando $\rho_0 < \rho_{\text{crítica}}$, o a la de un plano, sin curvatura, cuando $\rho_0 = \rho_{\text{crítica}}$. El universo se encontraría en ambos casos siempre en expansión y sería infinito. Estos modelos se representan en la figura 1.

Fridman no pudo ir más allá del análisis puramente matemático de sus soluciones para las ecuaciones relativistas. En uno de sus trabajos expresó: «Nuestra información es completamente insuficiente para llevar a cabo cálculos numéricos y distinguir qué clase de universo es el nuestro». Pero a pesar de ello puso de manifiesto la inestabilidad inherente al universo estático de Einstein y, lo que podría considerarse mucho más importante,

FIG. 1

Separación entre galaxias típicas

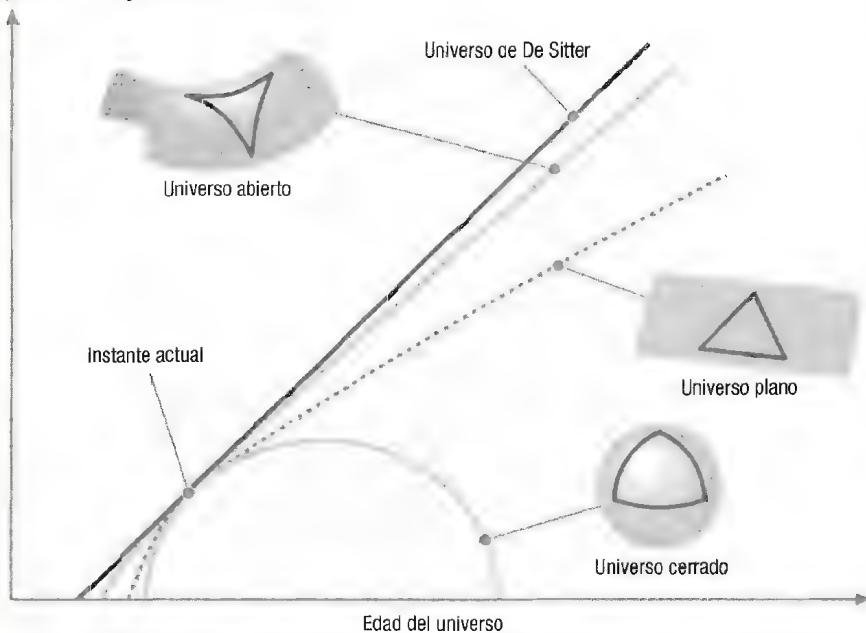


Figura en la que se representa la variación de la separación entre galaxias típicas en función de la edad del universo y que ilustra las soluciones de Fridman correspondientes a los universos cerrado, plano y abierto. Se muestra también la solución de De Sitter correspondiente a un universo sin masa.

el hecho de que el universo habría surgido de una singularidad inicial. También trató de establecer un valor para la edad del universo y basándose en estimaciones razonables de la masa total del mismo indicó que esa singularidad inicial podría haber ocurrido entre 10000 y 20000 millones de años atrás, una predicción destacable teniendo en cuenta el valor de 13800 millones de años actualmente aceptado para la edad del universo. En cualquier caso, los trabajos de Fridman no tuvieron repercusión alguna en la comunidad de los astrónomos.

En su libro *Los tres primeros minutos del universo*, el físico estadounidense Steven Weinberg (1933), que fue galardonado

ALEXANDER ALEXÁNDROVICH FRIDMAN

Alexander Fridman (apellido a veces escrito como Friedman o Friedmann) nació en junio de 1888 en San Petersburgo. Hijo de familia relacionada con la música (su padre era compositor y bailarín, y su madre pianista), fue educado en la fe de la Iglesia ortodoxa rusa. En 1897 ingresó en la Escuela Secundaria, donde destacó junto al que fue su amigo íntimo durante toda su vida, el gran matemático Yákov Tammkin. En 1905 ambos publicaron un artículo sobre los números de Bernoulli en la revista *Mathematische Annalen*, entonces dirigida por David Hilbert. En la Universidad de San Petersburgo tuvo como profesor, entre otros, al físico austriaco Ehrenfest y se graduó en 1910, obteniendo seguidamente una plaza de profesor en el Instituto de Minas de la misma ciudad. En 1911 se casó con Ekaterina Dorofeyeva. Defendió su tesis doctoral en 1922. Durante la Primera Guerra Mundial fue aviador militar e instructor de vuelo y llegó a dirigir la Estación Central Aeronáutica de Kiev. En 1918 ingresó como profesor en la Universidad de Perm y en 1920 obtuvo un puesto en el Observatorio Geofísico de Leningrado. En 1922 encontró soluciones de las ecuaciones de campo de la relatividad general en las que, además del universo estático que había encontrado Einstein aparecía la posibilidad de un universo dinámico en expansión abierto e infinito o cerrado y finito (que colapsa con el paso del tiempo). Fridman se interesó también en algunos problemas de hidrodinámica y meteorología y en 1925 logró un récord ascendiendo en globo hasta los 7 400 m para realizar distintos experimentos. Ese mismo año falleció víctima de fiebres tifoideas, mientras regresaba de unas vacaciones en Crimea. Unos meses antes, habiéndose divorciado de su primera esposa, contrajo matrimonio con Natalia Malinina. Los físicos George Gamow y Vladímir A. Fock fueron estudiantes suyos. Fridman fue honrado con la asignación de su nombre a un cráter de la cara oculta de la Luna.



Alexander Fridman en agosto de 1916, durante la Primera Guerra Mundial.

con el premio Nobel de Física en 1979, junto con Sheldon L. Glashow y Abdus Salam, por sus trabajos sobre la unificación de las interacciones electromagnética y débil, incluye una analogía que permite entender cómo sería el movimiento de las galaxias típicas en los modelos de Friedmann. Según Weinberg ese movimiento es similar al que observaríamos si lanzáramos una piedra hacia arriba desde la superficie terrestre. Todo dependería de la velocidad inicial de la piedra y su magnitud respecto de la denominada *velocidad de escape*, que es la velocidad mínima que debe llevar un objeto lanzado desde la Tierra para escapar de su atracción gravitatoria. Esta velocidad es proporcional a la raíz cuadrada del cociente entre la masa de la Tierra y su radio.

Si lanzamos la piedra con una velocidad inicial superior a la velocidad de escape, irá perdiendo progresivamente velocidad pero acabará escapando al infinito. Esta situación sería la que se tiene en el caso de una densidad cósmica inferior (o igual) a $\rho_{crítica}$. Por el contrario, si la velocidad inicial de la piedra es pequeña en relación a la velocidad de escape, subirá, alcanzará una altura máxima y volverá a caer, lo que se corresponde con una densidad cósmica por encima de $\rho_{crítica}$. Esta analogía también nos da una idea acerca de la «rareza» de un universo estático que se correspondería con que, después de lanzarla, la piedra se quedara suspendida en el aire.

Es interesante señalar que el modelo sin materia de De Sitter, que mencionamos en el capítulo anterior, correspondería a un universo abierto y dinámico, a pesar de que en un principio se había pensado que se trataba de un modelo estático. Ello se debió al sistema de coordenadas que De Sitter había considerado para encontrar la solución. De hecho, en 1922, el físico y matemático húngaro Kornél Lánczos (1893-1974) puso de manifiesto, mediante un simple cambio de coordenadas, que la solución de De Sitter se podía interpretar como una expansión del propio sistema de coordenadas. Aunque no hubiera materia presente en el universo, una «partícula de prueba» seguiría trayectorias en el espacio-tiempo bien definidas y una galaxia alejada del observador sería vista por este en movimiento.

LA VELOCIDAD DE ESCAPE

Supongamos que queremos lanzar un proyectil desde la superficie de la Tierra y que queremos conseguir que escape de la atracción que esta ejerce sobre él. ¿Cuál es la velocidad inicial con la que debemos lanzarlo? La respuesta a esta pregunta es sencilla: la velocidad de escape, que es una velocidad característica de cada cuerpo con masa. Supongamos ahora que m es la masa del proyectil, mientras que M_{\oplus} es la masa de la Tierra, y R_{\oplus} su radio. La forma más sencilla de evaluar la velocidad de escape es utilizar el principio de conservación de la *energía mecánica total*.

Energía cinética y energía potencial

En mecánica clásica los cuerpos tienen asociados dos tipos de energía. Una, la *energía cinética*, K , se debe a su estado de movimiento y se define como

$$K = mv^2/2,$$

donde m es la masa del cuerpo, y v , la velocidad con la que se mueve. Como vemos es siempre una cantidad positiva o igual a cero (cuando el cuerpo está en reposo). La otra es la *energía potencial*, U , que está asociada a la posición que el cuerpo ocupa en el espacio y que puede definirse siempre que sobre él actúen *fuerzas conservativas*, como es, por ejemplo, la fuerza de atracción gravitatoria. Así, nuestro proyectil, en presencia de la Tierra que lo atrae debido a la fuerza gravitatoria, tendría asociada una energía potencial que se define como

$$U = -GmM_{\oplus}/(R_{\oplus} + h),$$

siendo h la altura medida sobre la superficie a la que se encuentra el proyectil.

La velocidad de escape terrestre

La suma de la energía cinética y la energía potencial se denomina *energía mecánica total* o, simplemente, *energía total*, $E = K + U$, y es una cantidad que se conserva. Si en el momento en que se dispara el proyectil este tiene una velocidad v , su energía total es

$$E = mv^2/2 - GmM_{\oplus}/R_{\oplus}.$$

Como queremos lograr que el proyectil escape apenas de la atracción gravitatoria terrestre, y la gravedad tiene un alcance infinito, hemos de conseguir que el proyectil llegue, hipotéticamente, a una altura $h = \infty$ con velocidad nula, como mínimo. En tal caso su energía total sería 0. Por tanto, la conservación de la energía total impone que $E = 0$ y, despejando la velocidad v , obtenemos la velocidad de escape, que viene dada por:

$$V_{\text{escape}} = (2GM_1/R_1)^{1/2} = 11.2 \text{ km/s.}$$

Obviamente este es un cálculo simplificado en el que no se han tenido en cuenta diversos efectos como la resistencia del aire, la rotación terrestre, la atracción gravitatoria debida a la presencia de la Luna, del Sol, de los otros planetas y de otros astros. Pero en cualquier caso es una buena estimación de la velocidad requerida para que el proyectil escape de la gravedad terrestre.

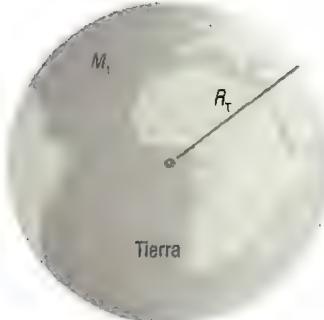
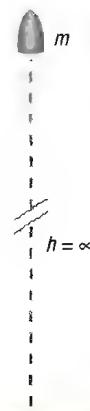
Como vemos, la velocidad de escape no depende de las características del proyectil sino solo de la constante de gravitación universal, G , y de la masa y el radio del objeto del que se pretende escapar. Cuanto mayor sea esa masa, mayor deberá ser la velocidad de escape.

Ejemplo de velocidad de escape en otros astros (en km/s)

Plutón	1,3
Luna	2,4
Marte	5,0
Venus	10,4
Saturno	35,5
Júpiter	59,5

La velocidad requerida para que un proyectil escape de la gravedad terrestre se puede calcular a partir de la masa de la Tierra (M_1), su radio (R_1) y la constante de gravitación universal (G). Para calcularla se supone que el proyectil lanzado desde la superficie terrestre alcanza una altura $h = \infty$, teniendo en ese momento una velocidad nula. La masa del proyectil es m . La doble barra inclinada indica que el gráfico no se muestra en toda su longitud.

Proyectil



EL DESPLAZAMIENTO DE LAS LÍNEAS ESPECTRALES

Los movimientos relativos de las galaxias y otros objetos estelares respecto de nosotros se conocían ya desde la segunda mitad del siglo xix. Primero el austriaco Christian Doppler (1803-1853), en 1842, y después el físico francés Armand Fizeau (1819-1896), en 1848, habían constatado cómo las líneas espectrales observadas en la luz proveniente de algunas estrellas aparecían desplazadas hacia la parte roja del espectro visible, es decir, con menor frecuencia de la esperada, mientras que en otros casos ese desplazamiento ocurría hacia la parte azul del espectro, la de mayor frecuencia. Ambas situaciones correspondían a las estrellas observadas que se encontraban en movimiento respecto de la Tierra, alejándose de o acercándose a ella. Doppler explicó el fenómeno que se conoce con su nombre.

Hubo que esperar sin embargo algunos años para que William Huggins llevara a cabo la primera determinación de la velocidad de una estrella en su alejamiento respecto de la Tierra mediante la medida del desplazamiento al rojo de las líneas espectrales de su radiación luminosa. En un trabajo que llevaba por título «Observaciones adicionales sobre los espectros de algunas estrellas y nebulosas con un intento de determinar si esos cuerpos están moviéndose hacia o desde la Tierra, también observaciones de los espectros del Sol y del Cometa II» y publicado en 1868 en la revista *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, aparecen esos primeros cálculos. Huggins fue un destacado especialista en el estudio de los espectros estelares y uno de los primeros en distinguir las nebulosas, que presentaban espectros puros, característicos de estructuras gaseosas con elementos químicos concretos, de las galaxias, con espectros más complejos típicos de estructuras estelares.

No fue hasta el cambio de siglo cuando la técnica de medida de los desplazamientos espectrales empezó a dar resultados reseñables. Y en ese tema hay que destacar al astrónomo estadounidense Vesto Slipher (1875-1969). En 1913 publicó un trabajo

EL DESPLAZAMIENTO DOPPLER

Los átomos se excitan al absorber radiación electromagnética con frecuencias que son características de cada uno de ellos. También se desexcitan emitiendo el mismo tipo de radiación que, en algunos casos, cae dentro del rango de la luz visible. Desde la última mitad del siglo xix, esos espectros de absorción y emisión característicos eran bien conocidos para muchos átomos. Cuando se empezaron a estudiar las líneas espectrales de las estrellas se observó que las frecuencias de las mismas no se correspondían con las encontradas en los experimentos realizados en la Tierra. La explicación del fenómeno fue dada por el matemático y físico austriaco Christian A. Doppler, quien en 1842 lo descubrió estudiando la luz emitida por estrellas binarias.

La frecuencia de la radiación se desplaza

Cuando una fuente que emite una radiación electromagnética está en movimiento con respecto al observador se produce un cambio en la frecuencia de la radiación, que pasa de ser f_o , cuando se emite desde la fuente, a valer, cuando es medida por el observador, $f_r = f_o [(c-v)/(c+v)]^{1/2}$, donde c es la velocidad de la luz y v es la velocidad relativa entre fuente y observador. Si ambos se alejan $v > 0$ y $f_r < f_o$; frecuencias más pequeñas significan longitudes de onda más grandes y las líneas espectrales aparecen desplazadas hacia el rojo (que es el color visible con menor frecuencia). Por el contrario, cuando fuente y observador se acercan, $v < 0$, $f_r > f_o$ y la frecuencia de la radiación observada se desplaza hacia el azul.

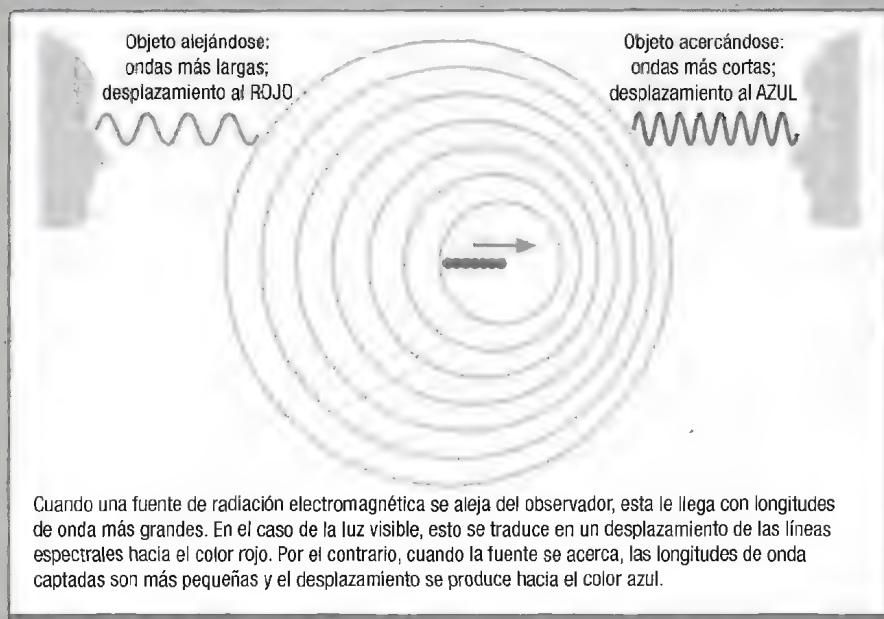
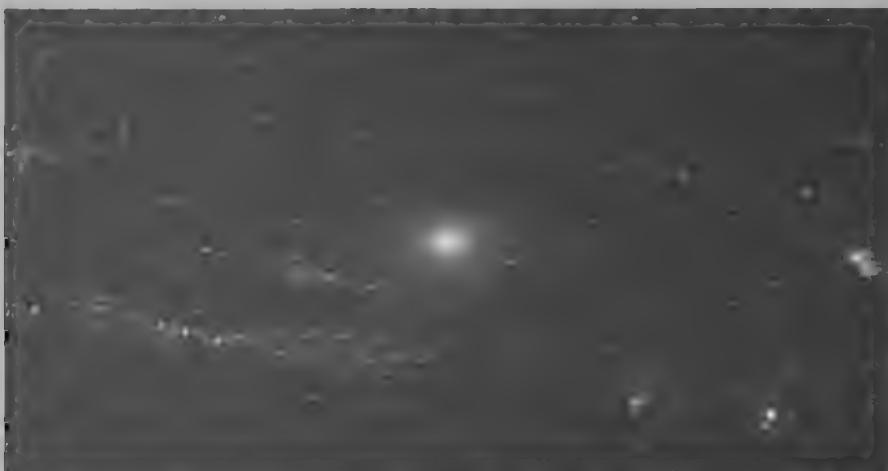


FIGURA SEÑERA DE LA ASTROFÍSICA

Vesto Melvin Slipher fue un astrónomo estadounidense nacido en 1875 en Mulberry (Indiana). Tras completar su doctorado en 1909 en la Universidad de Indiana se incorporó al Observatorio Lowell, en Flagstaff (Arizona), donde permaneció durante toda su carrera científica y del que fue director desde 1926 hasta 1952. Falleció en 1969. Especialista en espectroscopia, estudió las atmósferas planetarias y descubrió la «capa de sodio» presente en la mesosfera, una parte de la atmósfera terrestre. Fue responsable de la contratación del astrónomo Clyde Tombaugh (1906-1997), quien en 1930 descubrió Plutón. Por sus trabajos en el campo de la astrofísica fue galardonado con diversos premios y condecoraciones entre las que cabe destacar las Medallas de Oro de la Academia de Ciencias de París, en 1919, y de la Real Sociedad Astronómica de Londres, en 1932. Los cráteres Slipher de la Luna y de Marte se bautizaron así en su honor y en el de su hermano Earl Charles Slipher (1883-1964), también astrónomo de Lowell, especialista en Marte.

La rotación de las galaxias espirales

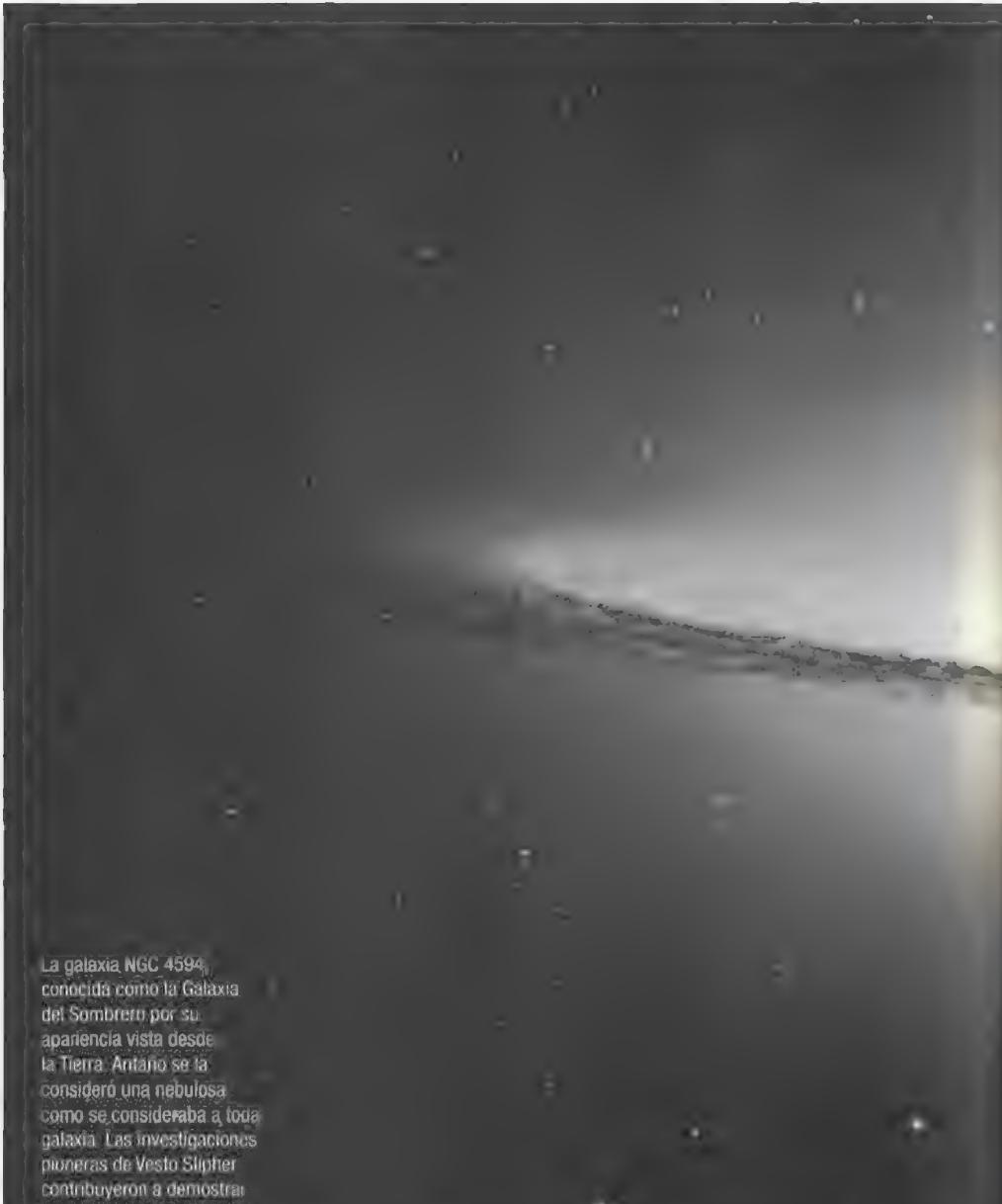
Su mayor logro es, sin duda, la realización de las primeras medidas de velocidades radiales de algunas galaxias basándose en la determinación del correspondiente desplazamiento al rojo. En 1914 presentó a la Sociedad Astronómica Estadounidense los resultados correspondientes a 15 galaxias de las que solo cuatro, entre ellas la de Andrómeda, se acercaban a la Tierra. Ese mismo año publicó un trabajo en el que estableció la rotación de las galaxias espirales.



Tal como Vesto Slipher determinó, la galaxia de Andrómeda se aproxima a la nuestra, a diferencia de otras que se alejan. La imagen muestra a la galaxia de Andrómeda (M31), captada en luz ultravioleta por el satélite astronómico Swift de la NASA.

en el que comunicaba la determinación de la velocidad de la «nebulosa de Andrómeda». De acuerdo a las medidas que había llevado a cabo entre septiembre y diciembre de 1912, Andrómeda se acercaba al sistema solar con una velocidad de 300 km/s. En mayo de 1914, en una corta nota publicada en el *Boletín del Observatorio Lowell*, Slipher anunciaba el descubrimiento de la rotación de las galaxias espirales: las líneas espectrales de la nebulosa de Virgo NGC 4594 aparecían inclinadas, lo que era sinónimo de que la nebulosa giraba alrededor de un eje. En agosto del mismo año, Slipher presentó a la Sociedad Astronómica Estadounidense datos sobre 15 galaxias de las que 11 mostraban un claro desplazamiento al rojo en sus espectros, es decir, se alejaban de la Tierra, algunas con velocidades de 1000 km/s o más.

Por fin, en 1917, en los *Proceedings of the American Philosophical Society*, apareció el trabajo titulado «Nebulosas» en el que Slipher ampliaba las mediciones anteriores, dando los resultados obtenidos para 25 sistemas: solo cuatro de ellos mostraban desplazamientos al azul; los restantes 21 se alejaban y las velocidades antes indicadas se confirmaban de manera que las galaxias se desplazaban con velocidades medias de unos 570 km/s. Pero en ese mismo trabajo, Slipher fue capaz de establecer el movimiento relativo del sistema solar respecto de las galaxias analizadas y llegó a la conclusión de que nos desplazábamos con una velocidad media de unos 700 km/s. Como ese mismo movimiento no era observado en el caso de estrellas cercanas, Slipher concluyó: «El hecho de que tengamos tal movimiento y las estrellas no lo muestren significa que nuestro sistema estelar al completo se mueve y nos lleva con él. Durante mucho tiempo se ha sugerido que las nebulosas espirales son sistemas estelares vistos a grandes distancias. Esta es la denominada teoría del “universo isla”, que considera nuestro sistema estelar y la Vía Láctea como una gran nebulosa espiral que nosotros vemos desde dentro. Me parece que esta teoría es favorecida por estas observaciones». Para algunos historiadores de la ciencia esta observación supone un punto notable en el entendimiento de la estructura del universo.



La galaxia NGC 4594, conocida como la Galaxia del Sombrero por su apariencia vista desde la Tierra. Antaño se la consideró una nebulosa, como se consideraba a toda galaxia. Las investigaciones pioneras de Vesto Slipher contribuyeron a demostrar que se trata de una galaxia.



LEMAÎTRE

Para Fridman, como hemos visto, la singularidad que había obtenido reanalizando las ecuaciones de la relatividad general solo era un «objeto matemático» presente en las soluciones que él había encontrado. Algun tiempo después, Eddington, en el libro *La naturaleza del mundo físico*, que se publicó en 1928, mencionó la posibilidad de un estado que podría corresponder a un principio del universo y su posterior expansión. Sin embargo, él no estaba convencido de ello: «Como científico no creo que el universo comenzara con un *bang*», decía al respecto, siendo curioso, a la vista de la historia posterior, que usara precisamente la palabra «bang» para referirse a ese instante.

Sin embargo, el primero en formular la hipótesis de un estado inicial del universo fue el astrónomo belga Georges Lemaître (1894-1966), profesor de física en la Universidad Católica de Lovaina. Nacido en Charleroi, sirvió en el ejército belga durante la Primera Guerra Mundial, tras lo que siguió estudios de matemáticas y física, doctorándose en 1920. Ese mismo año ingresó en el seminario de Malinas y fue ordenado sacerdote tres años más tarde:

En 1924, Eddington alabó a Lemaître en una carta que dirigió al físico belga Théophile de Donder (1872-1957), un firme defensor de la teoría de la relatividad y que un año antes había adquirido notabilidad por un trabajo en el que estableció la relación entre la *afinidad química* y la *energía libre de Gibbs*, dos magnitudes de importancia en termodinámica. Decía Eddington: «Encuentro que el Sr. Lemaître es un estudiante muy brillante, extraordinariamente rápido y perspicaz y de gran habilidad matemática».

Tan solo tres años más tarde, pudo Lemaître corroborar los elogios de Eddington con la publicación, en la revista *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, de un artículo titulado «Un universo homogéneo de masa constante y radio creciente que da cuenta de la velocidad radial de las nebulosas extragalácticas». En 1925, ya había lidiado con el modelo sin masa de De Sitter que hemos mencionado anteriormente y, de

hecho, había redescubierto las soluciones de las ecuaciones de Einstein que Fridman había encontrado años antes. Casi con toda seguridad, Lemaître no conocía en aquel entonces los artículos de Fridman, lo que pone en valor su trabajo, y al parecer no fue hasta su primera entrevista con Einstein, durante el Congreso Solvay que se celebró en Bruselas en otoño de 1927, cuando tuvo noticia de ellos. Aunque en este primer encuentro Einstein y él no estuvieron muy de acuerdo, más adelante mejoraron sus relaciones y Einstein terminó aceptando sus puntos de vista.

Al contrario que Fridman, en el trabajo de 1927 Lemaître consideró las soluciones dinámicas de las ecuaciones de la relatividad general desde un punto de vista más «físico» y supuso que el radio del universo podría variar con el tiempo de manera más o menos arbitraria. El universo que Lemaître alumbró entonces tenía una masa total que permanecía constante y habría evolucionado desde un estado preexistente, cerrado y cuyo radio cuando $t \rightarrow -\infty$ era R_0 , precisamente el radio del universo estático de Einstein. En definitiva, no se podía asignar una edad determinada al universo.

Pero entre los resultados de ese trabajo, destaca uno notable: una relación entre la velocidad de recesión v con la que las nebulosas extragalácticas se alejaban de nosotros y la distancia a la que se encontraban esas nebulosas, r . Lemaître estableció que $v/r = k \cdot c$, con $k = 0,68 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^{-1}$. Para obtener este valor utilizó valores medios de las velocidades de las nebulosas de las que Slipher y el astrónomo sueco Gustaf Strömberg (1882-1962) habían ido acumulando datos en los años anteriores, así como de las distancias a las mismas que había estimado Hubble. Curiosamente, Lemaître no parece dar una importancia excesiva al resultado. De hecho, en una de sus conclusiones establece que conocer el valor del cociente permitiría determinar el radio del universo en su estado primigenio:

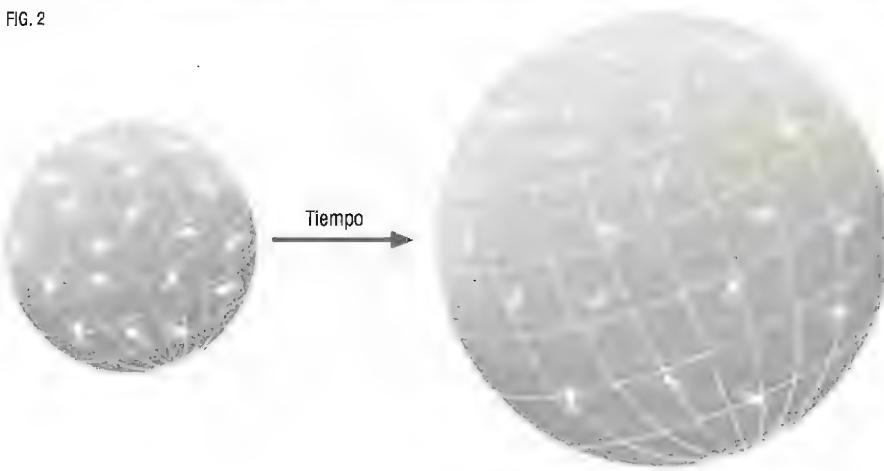
$$R_0 = \frac{c}{\sqrt{3}} \frac{r}{v}$$

y da una estimación de su valor: alrededor de 900 millones de años-luz.

Pero, por otra parte, sí que fue capaz de destilar una de las características esenciales del sistema, su expansión, y, aún más, estableció que los desplazamientos al rojo no se debían, como cabría interpretar de manera sencilla, a que las galaxias se alejaban de nosotros moviéndose en el interior de un universo estático y fijo, sino que eran provocados por la propia dinámica del sistema: «El alejamiento de las nebulosas extragalácticas es un efecto cósmico debido a la expansión del espacio», declaró en sus conclusiones. El carácter esencialmente cosmológico del mecanismo responsable de la expansión (figura 2) era así establecido por primera vez.

Sea porque la revista en la que se había publicado el trabajo era bastante desconocida o porque en 1927 no había demasiado interés entre los astrofísicos en discutir nuevas teorías cosmológicas, los resultados de Lemaître fueron ignorados hasta tres años más tarde. Eddington había leído un trabajo que el matemático y físico estadounidense Howard Robertson había publicado en 1928 en *Philosophical Magazine* y en el que esbozaba resultados similares a los de Lemaître, y comenzó a estudiar la estabilidad del universo. En la reunión de la *Royal Astronomical Society* celebrada en 1930, De Sitter presentó sus resultados recientes acerca de la velocidad de las nebulosas y discutió las implicaciones que se podían derivar de ellos en lo que hacía referencia a los dos sistemas entonces admitidos como posibles: la solución de Einstein, que no podía dar cuenta de ese movimiento de las nebulosas, y la del propio De Sitter, que solo era válida para una densidad de materia nula. Eddington señaló entonces que: «Una cuestión desconcertante es por qué deberían existir solo dos soluciones. Supongo que el problema es que la gente busca soluciones estáticas. ¿Deberíamos poner un poco de movimiento en el mundo de Einstein de materia inerte o un poco de materia en el *Primum mobile* de De Sitter?». Este comentario figuró en las actas del congreso que se publicaron en la revista *The Observatory* y Lemaître, que había sido estudiante de Eddington, le escribió después de leerlas haciéndole notar su trabajo.

FIG. 2



Podemos imaginarnos al universo como un globo que se está hinchando desde el Big Bang. Aunque las galaxias pintadas sobre la superficie de ese globo no se muevan de sus ubicaciones, a medida que el globo se infla se van separando unas de otras cada vez más, si bien en el caso del universo real no aumentan de tamaño como consecuencia de esa dilatación. La diferencia entre un estado pretérrito del universo (izquierda) y el actual (derecha) ilustra claramente ese progresivo distanciamiento entre galaxias.

Eddington informó a De Sitter de los resultados de Lemaître que al punto adquirió notabilidad. En 1930 su modelo, conocido desde entonces como el modelo de Lemaître-Eddington, resolvió las dificultades inherentes a los dos sistemas estáticos que hasta ese momento se habían considerado como los únicos posibles y abrió las puertas definitivamente a otros modelos que incluyeran la expansión del universo.

EL ÁTOMO PRIMIGENIO

La idea de un universo que hubiera tenido un principio, que tuviera una edad definida, no era del agrado de astrofísicos y astrónomos. Hasta ese momento, y como se ha comentado anteriormente, solo Fridman había esbozado esa posibilidad aunque únicamente como una mera «curiosidad» matemática. Sin

embargo, establecida la expansión del sistema, Lemaître había sugerido que esta habría podido originarse en una inestabilidad del universo estático producida por la presión de la radiación electromagnética presente en el mismo. En su artículo «El universo en expansión», publicado a principios de 1931 en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, fue más lejos e indicó que podría haber existido un «protouniverso» estático en el que «toda la energía estuviera en forma de radiación electromagnética y súbitamente se condensara en materia».

Este primer salto cualitativo en su visión de los primeros estadios del universo se vio refrendado en una corta nota publicada en *Nature* en 1931, titulada «El principio del mundo desde el punto de vista de la teoría cuántica» y que algunos historiadores consideran como una de las comunicaciones más excepcionales de la ciencia moderna. Lemaître firma la nota con su dirección privada (*40 rue de Namur, Louvain*), no como profesor universitario, y comienza la misma con el siguiente párrafo: «Sir Arthur Eddington dice que, filosóficamente, la noción de un principio en el presente orden de la naturaleza le repugna. Yo más bien me inclino a pensar que el estado actual de la teoría cuántica sugiere un principio del mundo muy diferente del presente orden de la naturaleza». Su argumentación se basaba, por un lado, en la mecánica cuántica, que se encontraba en ese momento en el apogeo de su desarrollo, y, por otro, en la termodinámica. Y su conclusión era completamente innovadora: «Podríamos concebir el principio del universo en la forma de un átomo único cuyo peso atómico es la masa total del universo. Este átomo altamente inestable se dividiría en átomos más y más pequeños en el curso de una especie de proceso superradiactivo». Lemaître elaboró esta idea básica y la presentó en sendas conferencias dictadas ante la Sociedad Astronómica Belga y la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia y en una publicación de aquel mismo año, aparecida en la *Revue des Questions Scientifiques* y titulada «La expansión del espacio». Entre otras cuestiones relevantes, Lemaître decía en ese artículo: «Las primeras etapas de la expansión consistieron en una rápida expansión determinada por la masa del átomo inicial, casi igual a la masa actual del universo. [...] La expansión inicial

fue capaz de permitir que el radio excediera el valor del radio de equilibrio. La expansión tuvo lugar así en tres fases: un primer periodo de expansión rápida en la que el átomo-universo se rompió en estrellas atómicas, un periodo de ralentización, seguido por un tercer periodo de expansión acelerada».

Lemaître denominó a su teoría como la del *átomo primigenio* y no cabe duda de la influencia que en su formulación recibió de los resultados de Fridman (con los que entonces ya estaba familiarizado) y, sobre todo, de los fenómenos relacionados con los procesos radiactivos, tal y como él mismo puso de manifiesto en un trabajo publicado en 1949 bajo el título de «La constante cosmológica» en un volumen homenaje a Einstein: «La idea de esta hipótesis surgió cuando tuvimos noticia de que la radiactividad natural es un proceso físico que desaparece gradualmente y que, por tanto, puede esperarse que haya sido más importante en tiempos anteriores. Si no fuera por unos pocos elementos de vidas medias comparables a T_{H} , la radiactividad natural se habría extinguido completamente ahora». Aquí Lemaître hace referencia al denominado *tiempo de Hubble*, T_{H} , un valor que proporciona una estimación de la edad del universo y sobre el que volveremos más adelante. Para Lemaître el hecho de que radioisótopos como el ^{238}U (uranio-238) o el ^{232}Th (torio-232) tuvieran vidas medias del orden de los miles de millones de años, es decir, similares a sus estimaciones de la edad del universo, no era una cuestión casual ya que si el universo hubiera sido mucho más antiguo estos elementos radiactivos no existirían.

En cualquier caso, esta argumentación basada en la radiactividad ya había sido utilizada con anterioridad para sugerir un universo de edad finita. El físico austriaco Arthur E. Haas (1884-1941) hizo notar en 1911 que la existencia de los elementos radiactivos era contradictoria con la de un universo eterno en el tiempo. Haas es también conocido porque en su trabajo de habilitación como *Privatdozent* en la Universidad de Viena, en 1910, desarrolló un tratamiento del átomo de hidrógeno en el que los estados electrónicos estaban cuantizados, es decir, que

El progreso científico es el descubrimiento de una simplicidad cada vez más exhaustiva.

GEORGES LEMAÎTRE

los electrones atómicos solo podían ocupar algunos estados con energías concretas, al igual que en el modelo de Bohr de 1913.

Lemaître consideró también en la fundamentación de su teoría la denominada *hipótesis de la creación entrópica* que favorecería un universo finito en el tiempo debido a la existencia de un proceso termodinámico irreversible: el continuo incremento de la entropía del mismo. Curiosamente este argumento había sido utilizado por los filósofos de la escuela neoescolástica de finales del siglo xix y principios del xx para probar la existencia de Dios y Lemaître seguramente tenía conocimiento del mismo por su formación eclesiástica.

El modelo de Lemaître excluía explícitamente la presencia de una singularidad, del estilo de las encontradas por Fridman. No discutió el origen de ese átomo primigenio sino que asumió su existencia previa a su «explosión radiactiva». Según él, antes de ese instante no era posible obtener información sobre las propiedades físicas del sistema ya que el tiempo y la expansión del universo solo habrían «empezado» inmediatamente después de su desintegración. Y justo en ese instante las leyes de la física habrían comenzado a operar sobre el universo. «Nada puede ocurrir donde no hay sitio para que ocurra», había escrito para describir ese hecho el astrónomo estadounidense Donald H. Menzel (1901-1976) en un artículo publicado en 1932 en la revista *Popular Science* que tituló con un llamativo «La explosión de un átomo gigante creó nuestro universo». Y aclaró en el mismo que «el Dr. Lemaître prefiere creer que el universo completo nació en el destello de un cohete cósmico y que estará expandiéndose hasta que los fuegos artificiales que forman las estrellas se hayan quemado en cenizas y escoria».

Los trabajos de Lemaître sobre la expansión del universo habían sido bien aceptados en la comunidad científica después de que Eddington y Robertson los dieran a conocer y contaron con el beneplácito de Einstein, De Sitter y el físico-matemático estadounidense Richard C. Tolman (1881-1948), entre otros. A lo largo de la década de 1930, la imagen del universo en expansión se había ido consolidando como la hipótesis fundamental de trabajo entre los especialistas de la materia (figura 3). No solo eso

FIG. 3

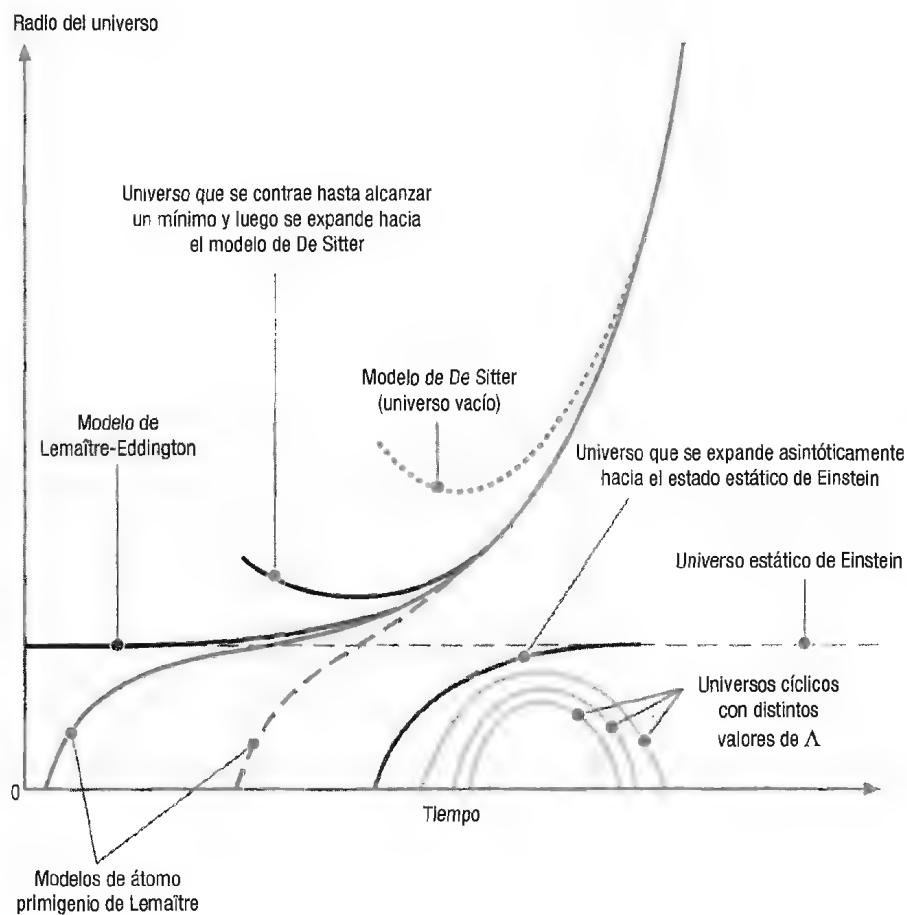


Figura que muestra la variación del radio del universo con el paso del tiempo para algunos de los modelos existentes en la década de los años 30 del siglo xx. Los modelos de átomo primigenio y los cíclicos (con distintos valores de Λ , la constante cosmológica) representan universos con edad finita. Aparece también el modelo de universo estático de Einstein, así como uno que evoluciona hacia ese mismo estado mediante una expansión asintótica (representada aquí por una curva que cada vez se iguala más a la recta que representa el universo estático de Einstein).

sino que esa imagen había recalado también entre el público no especializado a través de artículos en revistas de divulgación y de varios libros entre los que cabe destacar *El universo misterioso*, del astrónomo inglés James H. Jeans, *Kosmos*, de De Sitter, y *El universo en expansión*, de Eddington.

Hemos hallado una extraña huella en las orillas de lo desconocido.

ARTHUR EDDINGTON

Otro devenir bien distinto acaeció, sin embargo, con la hipótesis de un universo finito en el tiempo. Por un lado, ese modelo de universo gozó de una aceptación plena de fascinación por parte de los periódicos y de las

revistas de divulgación científica. Por ejemplo, el 19 de mayo de 1931, tan solo diez días después de la publicación de la nota de Lemaître en *Nature*, el periódico *The New York Times* encabezó un detallado artículo con el título: «Le Maître sugiere que un único gran átomo contenido toda la energía inició el universo». Por su parte, revistas como *Popular Mechanics* o la mencionada anteriormente *Popular Science* presentaron la teoría con profusión.

Como ya dijimos, Lemaître había publicado los detalles de su modelo en la *Revue des Questions Scientifiques*, una revista de poca difusión, y solo a raíz de las distintas conferencias que impartió durante los tres años que siguieron a dicha publicación, su átomo primigenio fue conocido. Pero salvado el desconocimiento inicial, el eco que el modelo del átomo primigenio de Lemaître tuvo entre los astrónomos, cosmólogos y astrofísicos fue escaso y, cuando las hubo, las reacciones por parte de la comunidad científica fueron de claro rechazo.

Sin duda, en el momento en que fue propuesto, un universo de edad finita resultaba una hipótesis demasiado radical para que fuera considerada en serio. Ya hemos mencionado que el propio Lemaître hablaba de la repugnancia que esa idea causaba en Eddington. Tolman, por su parte, en su célebre libro *Relatividad, termodinámica y cosmología*, aparecido en 1934, la catalogaba como uno de los «males del pensamiento autista e ilusorio» presente en aquel momento en la cosmología. En ese mismo libro indicaba: «... hay que hacer notar que los universos monótonos

[...] que se expanden desde un estado singular, podrían ofrecer algunas ventajas al proporcionar una larga escala temporal subsiguiente al estado singular. Lemaître ha abogado recientemente por tales modelos y ha descrito de manera pintoresca el estado original singular como un átomo gigante». Y Hubble se refería al modelo de Lemaître como «poco atractivo y bastante dudoso», aunque no encontrara argumentos de peso para rechazarlo de plano. Una parte importante de los astrónomos más reputados de la época, como Robertson o el alemán Otto Heckmann, se decantaban sin ambages por el «atractivo» modelo de Lemaître-Edington, carente de comportamientos catastróficos. Otros, como el canadiense John S. Plaskett (1865-1941), se limitaban a defenestrar sin más la hipótesis de Lemaître: «Es la especulación más salvaje de todas, aún más, es un ejemplo de especulación alocada sin una mínima evidencia para respaldarla», escribió en un artículo publicado en 1933 en el *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*.

Otros físicos, como el inglés Paul A.M. Dirac (1902-1984), el estadounidense de origen ruso George A. Gamow (1904-1968) y el alemán Carl F. von Weizsäcker (1912-2007), ni siquiera mencionaron el modelo de Lemaître en sus trabajos, a pesar de que consideraban como acertadas imágenes del universo similares a la de este. Una de las pocas referencias al átomo primigenio de aquella época se debe a E. Pascual Jordan (1902-1980), físico y matemático alemán y uno de los pioneros de la teoría cuántica, que en su libro *La física del siglo xx*, publicado en 1936, hizo referencia a Lemaître al aseverar que «Hace diez mil millones de años, el universo inicialmente pequeño surgió de una explosión original». Defendía pues Jordan un universo finito, tanto en el espacio como en el tiempo, claramente inspirado en el modelo del átomo primigenio.

Algunos historiadores e investigadores han argumentado que Lemaître, como sacerdote católico que era, podría haber ligado las bases de su modelo de universo a sus creencias sobre Dios. Einstein, en 1932, advirtió acerca de que la hipótesis del átomo primigenio «estaba inspirada por el dogma cristiano de la creación y era completamente injustificada desde un punto

de vista científico». A pesar de ello, dio su apoyo en 1934 a Lemaître cuando fue postulado (y obtuvo) al premio Francqui, una distinción que se concede a jóvenes científicos belgas. Lemaître siempre tuvo, no obstante, muy clara la diferencia entre el ámbito científico y el religioso: «La teoría cosmológica permanece completamente al margen de cualquier cuestión metafísica o religiosa. Ciencia y religión corresponden a niveles separados del entendimiento».

Observación: una poderosa herramienta

La cosmología, la astronomía y la astrofísica no han escapado nunca del papel fundamental que juegan la observación y la experimentación en la validación de las teorías y modelos que se han ido planteando a lo largo del tiempo. En el caso del Big Bang este papel resultó especialmente decisivo para propiciar su aceptación mayoritaria.

El 26 de abril de 1920 tuvo lugar el Gran Debate. En él, los astrónomos estadounidenses Harlow Shapley (1885-1972) y Heber Curtis (1872-1942) se vieron las caras en el auditorio Baird del Museo de Historia Natural del Instituto Smithsonian en Washington. El objeto del encuentro no era otro sino el de tratar de dilucidar una cuestión fundamental: ¿cuál es el tamaño real del universo? Shapley defendía que la Vía Láctea constituía todo el universo y que nebulosas como la de Andrómeda (que con el paso del tiempo sería reconocida como una galaxia) formaban parte de ella. Contaba Shapley con sus correspondientes adeptos entre los que se puede destacar al astrónomo holandés Adriaan Van Maanen (1884-1946), quien mantenía que había sido capaz de observar cómo giraba la galaxia del Molinete (NGC 5457): si eso era cierto y esa galaxia era externa a la nuestra, su velocidad de rotación habría sido enorme, superior a la velocidad de la luz.

Por su parte Curtis opinaba que Andrómeda y otras nebulosas eran objetos externos a la Vía Láctea, universos isla diferentes por tanto. Uno de los argumentos fundamentales de Curtis era que las observaciones indicaban que el número de *novas* que ocurrían en Andrómeda era significativamente superior al de las detectadas en la Vía Láctea. Una *nova* es el resultado de un proceso

que ocurre en un sistema estelar binario en el que una de las dos estrellas es una enana blanca. Esta arranca materia de la estrella compañera y, en determinadas circunstancias, se producen reacciones de fusión que se inician con el hidrógeno y siguen con el helio y otros elementos más pesados. De resultas la estrella presenta durante un cierto tiempo un brillo muy por encima de su nivel normal. Curtis argumentaba que si Andrómeda formaba parte de nuestra galaxia, no tenía sentido que una parte de la misma presentara más eventos de este tipo que otras, por lo que solo cabía concluir que se trataba de galaxias separadas.

Enseguida quedó demostrado que las observaciones de Van Maanen eran incorrectas (no habría sido posible detectar el movimiento de la galaxia NGC 5457 con tan solo unos pocos años de observación) y la hipótesis de Curtis se reveló por tanto la más acertada. Sin embargo, el tamaño real de la Vía Láctea se encuentra entre los que ambos astrónomos establecieron en su momento y, por otro lado, Shapley estaba en lo cierto cuando situaba el sistema solar en una zona externa de la galaxia que, sin embargo, Curtis suponía centrada en el Sol.

No pudieron pues establecerse conclusiones definitivas del Gran Debate, pero como el astrónomo estadounidense de origen chino Frank H. Shu (1943) hizo notar en su libro *El universo físico. Una introducción a la astronomía*, publicado en 1982: «El debate de Shapley y Curtis [...] es importante no solo como un documento histórico, sino también como una inspección del proceso de razonamiento de científicos eminentes ocupados en una gran controversia en la que la evidencia es, en ambos lados, fragmentaria y parcialmente incorrecta. Este debate ilustra enfáticamente cuán delicado es escoger el propio camino a través del peligroso terreno que caracteriza la investigación en las fronteras de la ciencia».

¡HABÍA UNIVERSO MÁS ALLÁ DE LA VÍA LÁCTEA!

Pero el espaldarazo a los argumentos de Curtis relativos al tamaño del universo vinieron de parte de Hubble, quien puso de mani-

fiesto poco después que la distancia a tres nebulosas concretas era mayor que las dimensiones que Shapley había propuesto para nuestra galaxia.

En tres artículos publicados en 1925,

1926 y 1929 estableció sin lugar a dudas el carácter extragaláctico de NGC 6822, M33 y M31, respectivamente, y pudo cerrar el debate confirmando la hipótesis de Curtis que también había sido establecida por los astrónomos Ernst J. Öpik (1893-1985), estonio, y Knut E. Lundmark (1889-1958), sueco.

Öpik había publicado en 1922, en *Astrophysical Journal*, un trabajo titulado «Una estimación de la distancia de la nebulosa de Andrómeda» en el que aplicó un método novedoso que se basaba en suponer que «la aceleración centrípeta a una distancia r del centro [de la galaxia] es igual a la aceleración gravitatoria debida a la masa dentro de la esfera de radio r ». Asumiendo que la energía radiada por unidad de masa era la misma que la observada en la Vía Láctea, estimó la distancia a Andrómeda en 450 kpc (kilopársecs), un valor que estaba de acuerdo con otras estimaciones coetáneas y que estaba relativamente próximo al actualmente admitido (775 kpc). En las conclusiones de su trabajo, Öpik indica: «La coincidencia de resultados obtenidos con varios métodos independientes incrementa la probabilidad de que esta nebulosa sea un universo estelar, comparable a nuestra galaxia». Y añade finalmente, refiriéndose a la asunción de una energía radiada por unidad de masa constante para las distintas galaxias: «Si suponemos que la energía de los cuerpos celestes tiene su fuente en algunos procesos como la radiactividad, entonces nuestra suposición significa que el porcentaje de materia radiactiva en el sistema de la nebulosa de Andrómeda y en el sistema galáctico [de la Vía Láctea] son iguales».

Un año más tarde, Lundmark estimó la distancia a Andrómeda en un artículo titulado «Algunos hechos y sugerencias que conciernen a la nova», que apareció en la revista *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. Para ello llevó a cabo un estudio detallado de las magnitudes de 78 novas, de las que 48 correspondían a la Vía Láctea, 22 se habían observado en

Las observaciones siempre traen consigo teoría.

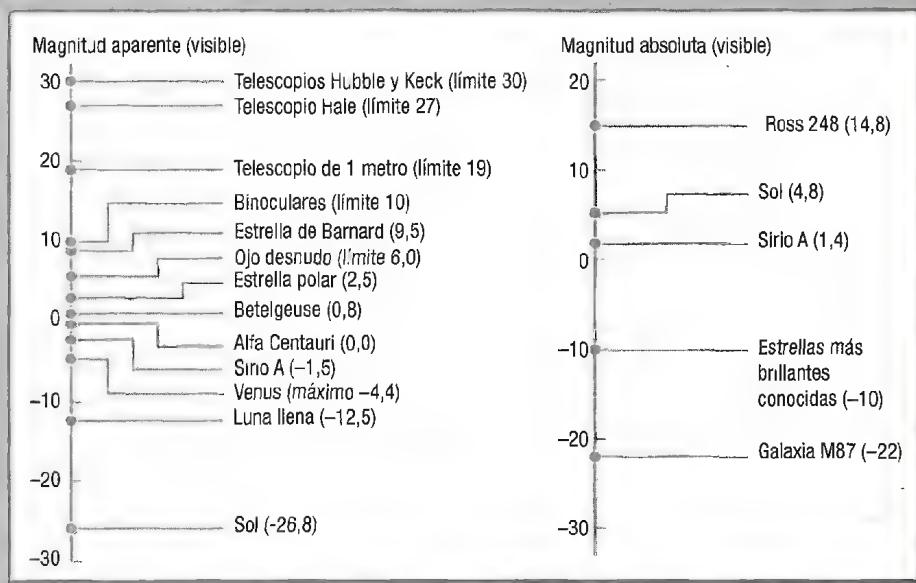
EDWIN HUBBLE

LA MAGNITUD DE LAS ESTRELLAS

La *magnitud* de una estrella (o de un objeto estelar) es una medida de su brillo. Aunque ya Hiparco y Ptolomeo habían establecido una escala de magnitudes de acuerdo al tamaño aparente con que las estrellas eran observadas (de ahí el nombre), la definición moderna está basada en medidas fotométricas en las que, sobre el campo de visión de un telescopio, se proyecta una luz que hace las veces de «estrella artificial» y cuyo brillo se ajusta para reproducir el de la estrella concreta que se está analizando. La escala que se utiliza es de tipo logarítmico y fue propuesta en 1856 por el astrónomo inglés Norman R. Pogson (1829-1891). De acuerdo a ella, un incremento de magnitud de una unidad supone aumentar el brillo en un factor $\sqrt[100]{100} \approx 2,5119$, de manera que dos estrellas cuya magnitud difiera en 5 unidades presentarán brillos que diferirán en un factor de 100. La escala está construida de manera que los objetos más brillantes tienen magnitudes grandes y negativas mientras que para los muy tenues son grandes y positivas.

Tipos de magnitud

Hay que distinguir entre la *magnitud aparente* y la *absoluta*. La primera hace referencia al brillo del objeto tal y como lo ve un observador en la Tierra, ajustado al valor que tendría en ausencia de atmósfera. Para su determinación se suelen utilizar el espectro visible y la denominada banda-J del infrarrojo cercano. En esta última, la estrella más brillante es Betelgeuse con una magnitud de -3,0. La magnitud de esta estrella en el visible es 0,8. En el visible, la estrella más



brillante es Sirio A (-1.5) si excluimos el Sol (-26.8). La magnitud absoluta es una medida del brillo intrínseco de un objeto. Se determina como la magnitud aparente de ese objeto a una distancia de 10 pc (parsecs) del observador, suponiendo que no hay extinción astronómica de la luz emitida por el objeto (es decir, absorción de la misma debido al gas y al polvo interestelar presentes entre el objeto emisor y el observador). Esto permite comparar los objetos celestes en cuanto a su brillo, independientemente de las distancias a las que se encuentran. Como en el caso de la magnitud aparente, se puede definir para una parte concreta del espectro electromagnético. Evidentemente, cuando se trata de objetos alejados, los desplazamientos al rojo pueden ser relevantes y existirían diferencias importantes entre el espectro emitido por el objeto y el observado. En tales casos es necesario tener en cuenta ese efecto, lo que se lleva a cabo mediante la denominada corrección k . La magnitud absoluta del Sol en el visible es de 4.8 y la de Sirio A, que es más brillante, 1.4. Estrellas como Deneb o Betelgeuse, con magnitudes absolutas de -7.2 y -5.6 , respectivamente, harían que los objetos en la Tierra hicieran sombra si se encontraran a 10 pc de distancia.



La galaxia M87, con su notable halo, destaca en el centro de esta imagen tomada por Chris Mihos de la Universidad Case Western Reserve en colaboración con el Observatorio Europeo Austral (ESO).

Andrómeda y 8 más en otras nebulosas espirales. En su artículo concluye: «Esto daría una distancia de 4 300 000 años-luz. Si, como algunos autores piensan, la distancia a la nebulosa [de Andrómeda] es del orden de 20 000 años-luz, entonces la conclusión debe ser que las novas en ese sistema son de una clase bastante diferente que las novas galácticas [...] En la actualidad no es posible decidir cuál de las dos posibilidades es la correcta». Lundmark no estaba muy seguro pues de los mecanismos que regían la aparición de las novas y no fue capaz de comprender el impacto que su resultado (unos 1300 kpc) tenía en relación a la situación extragaláctica de Andrómeda.

Edwin Hubble había nacido en Marshfield (Missouri) en 1889. Sus estudios universitarios los realizó en la Universidad de Chicago, donde se dedicó a las matemáticas y la astronomía, aunque obtuvo posteriormente un máster en jurisprudencia en el *Queen's College* de Oxford, donde también estudió literatura y español. De vuelta en Estados Unidos, enseñó español, física y matemáticas en el instituto de New Albany (Indiana) y no fue hasta 1914 cuando se decidió a iniciar su carrera como astrónomo. Obtuvo el doctorado en 1917 con un trabajo titulado «Investigaciones fotográficas de nebulosas distantes» que había realizado en el observatorio Yerkes. En 1919, concluida la Primera Guerra Mundial, el astrónomo estadounidense George Hale (1868-1938), a la sazón director del observatorio de Monte Wilson, en Pasadena (California), le ofreció un puesto permanente.

En los tres trabajos antes mencionados, todos ellos publicados en *Astrophysical Journal*, Hubble determinó que las distancias a los sistemas estudiados eran 214 kpc para NGC 6822, 263 kpc para M33, y 275 kpc para M31, esta última algo menor que la que había estimado Öpik. En el primero de los artículos, titulado «NGC 6822, un sistema estelar remoto», Hubble habla de que la nebulosa estudiada era «el primer objeto asignado definitivamente a una región fuera del sistema galáctico». Y su primera conclusión es notable: «Esta investigación ha identificado NGC 6822 como un sistema aislado de estrellas y nebulosas del mismo tipo que las Nubes de Magallanes, aunque algo más pequeñas y mucho más distantes. Una estructura consistente

LAS «COMPUTADORAS DE HARVARD»

Henry Draper fue un médico y astrónomo aficionado que desarrolló un procedimiento para la fabricación y pulido de los espejos utilizados en los telescopios reflectores. En 1872 construyó uno de 71 cm de apertura con el que obtuvo numerosos espectros de estrellas. Tras su muerte, su viuda concedió un fondo de 400 000 dólares al Observatorio de Harvard para financiar la creación del catálogo Henry Draper de datos astronómicos. El encargo lo recibió Edward C. Pickering, director del observatorio y especialista en espectros estelares. Pickering contrató a varias mujeres especialistas, como Williamina P.S. Fleming, que ejerció de directora del grupo y que estableció los primeros estándares fotográficos de magnitud usados para medir el brillo de las estrellas variables, Annie J. Cannon, que desarrolló un sistema de catalogación de estrellas que fue adoptado por la Unión Astronómica Internacional en 1922, o Henrietta S. Leavitt, que descubrió las características básicas de las estrellas variables cefeidas. En el grupo prestó su ayuda también Antonia Maury, sobrina de Draper. Todas ellas eran astrónomas y desarrollaron una labor descomunal en el proceso de identificación y catalogación de estrellas, utilizando metodologías que hoy día se llevan a cabo mediante computadoras. De ahí que recibieran el sobrenombre de «las computadoras de Harvard». Contaron con la ayuda de asistentes, también mujeres, con distintos niveles de formación. El equipo clasificó los espectros de 225 000 estrellas en solo cuatro años de trabajo. El primer catálogo se publicó en 1890 y contenía información sobre unas 10 000 estrellas; posteriormente fue ampliado en 1918, 1924 y 1949 hasta alcanzar las 360 000. Su remuneración era la mitad de la que recibían los hombres en puestos similares.



Las «computadoras de Harvard» en el trabajo (hacia 1890). La tercera por la izquierda, sentada y con una lupa, es Henrietta Leavitt. De pie, en el centro, Williamina P.S. Fleming.

se alza así sobre la base del criterio de las cefeidas, en la que las dimensiones, luminosidades y densidades, tanto del sistema completo como de sus miembros separados, son de los órdenes de magnitud completamente familiares. La distancia es la única cantidad de un orden nuevo».

El título del primero de los otros dos artículos no dejaba lugar a dudas: «Una nebulosa espiral como un sistema estelar, Messier 33». Y el de 1929 tenía el mismo título pero para Messier 31. Estos tres artículos fueron los únicos que Hubble escribió sobre el tema de las distancias a nebulosas alejadas y no cabe duda de que dejaron la discusión cerrada. La base de sus resultados era mucho más cuantitativa y de ahí que tuvieran mayor credibilidad. Pero para ello Hubble había contado con una herramienta poderosa y precisa: las cefeidas (véase la imagen de las págs. 86-87).

LAS CEFEDAS

Hubble había utilizado los dos telescopios reflectores de 1,5 m y 2,5 m del observatorio de Monte Wilson y eso le permitió identificar estrellas individuales en las nebulosas espirales que había estudiado. Algunas de esas estrellas resultaron ser variables cefeidas, lo que le abrió las puertas a una determinación cuantitativa de las distancias a las que las nebulosas se encontraban.

Este tipo de estrellas tienen como característica fundamental que brillan y se oscurecen con un periodo temporal regular. La primera de estas estrellas de la que se tiene noticia es Eta Aquilae, en la constelación del Águila, que fue detectada por el astrónomo inglés Edward Pigott en 1784. Sin embargo, el nombre de cefeidas se debe a Delta Cephei, de la constelación de Cefeo, que fue descubierta ese mismo año por John Goodricke, un astrónomo aficionado nacido en Holanda.

Fue la astrónoma estadounidense Henrietta S. Leavitt (1868-1921) quien estableció la relación entre la luminosidad y el periodo de esas estrellas. En 1908 publicó en *Annals of Harvard College Observatory* un artículo titulado «1777 variables en las

MIDIENDO LAS DISTANCIAS A LAS ESTRELLAS: CANDELAS ESTÁNDAR

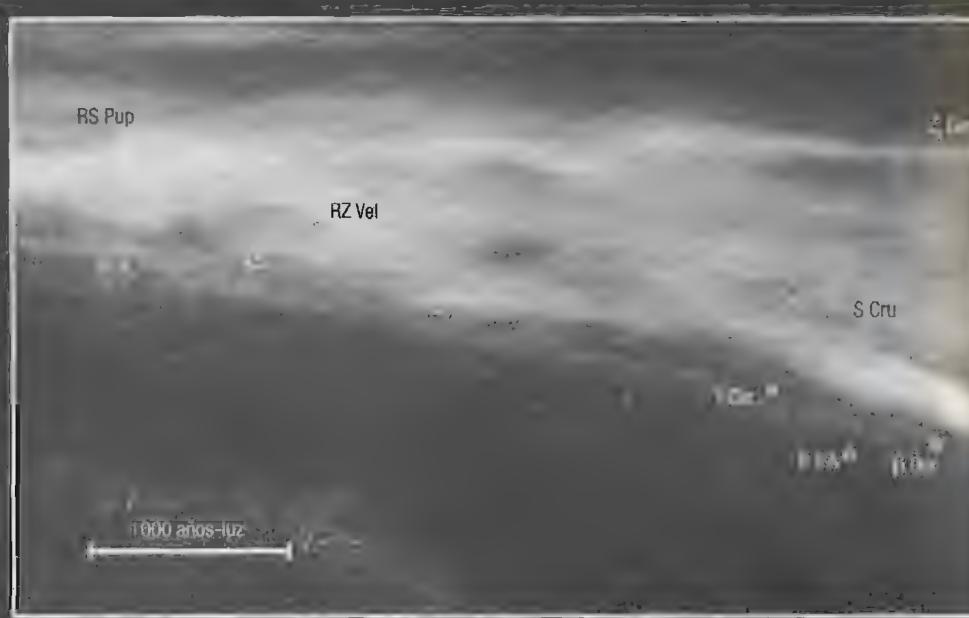
Cuando la distancia a un objeto estelar es demasiado grande para poder medirla mediante la paralaje (recuérdese que el ángulo de paralaje disminuye con la distancia), en astronomía se hace uso de las candelas estándar. Una candela estándar es una fuente de luz que tiene luminosidad L conocida, entendiendo por luminosidad la potencia (la cantidad de energía por unidad de tiempo) total emitida. La fuente emite en todas las direcciones por igual, de manera que, cuando la luz llega a la Tierra, la potencia total se habrá distribuido en una superficie esférica de radio r (la distancia de la fuente a la Tierra). La potencia recibida en la Tierra por unidad de área será por tanto $L/(4\pi r^2)$; a mayor distancia, menor es la potencia por unidad de superficie detectada, que sigue la denominada *ley del inverso del cuadrado de la distancia*.

Luminosidad y distancia

Son varios los tipos de estas fuentes existentes en el universo, pero los dos más utilizados son las estrellas variables cefeidas y las supernovas de tipo Ia. Las primeras son estrellas cuya luminosidad varía regularmente con períodos que pueden ir desde unas horas hasta unos 100 días y magnitudes entre 0,35 y 1,5. La ley periodo-luminosidad proporciona una relación entre la magnitud de la cefeida y su periodo de pulsación. Midiendo el periodo de una de ellas se puede predecir su luminosidad y teniendo en cuenta cuán brillante se ve desde la Tierra es posible calcular la distancia. Estas estrellas se han utilizado para determinar distancias a galaxias alejadas hasta unos 30 Mpc (megapársecos). Las supernovas de tipo Ia aparecen cuando una enana blanca de un sistema binario extrae masa de su compañera hasta que alcanza un valor tal que sufre un colapso gravitacional que da lugar a una reacción nuclear seguida de una explosión muy brillante. La masa límite es siempre la misma: unas 1,4 masas solares; y, por tanto, también lo es la luminosidad, lo que permite estimar la distancia comparando magnitudes. Su nivel de brillo alcanza el de una galaxia completa y eso permite verlas a distancias de hasta 10 Gpc (gigapársecos).



Una candela estándar es una fuente de luz de la que se sabe su potencia total emitida (luminosidad). La fuente emite en todas las direcciones por igual, de manera que, cuando la luz llega a la Tierra, la potencia total se habrá distribuido en una superficie esférica de radio r (la distancia de la fuente a la Tierra).

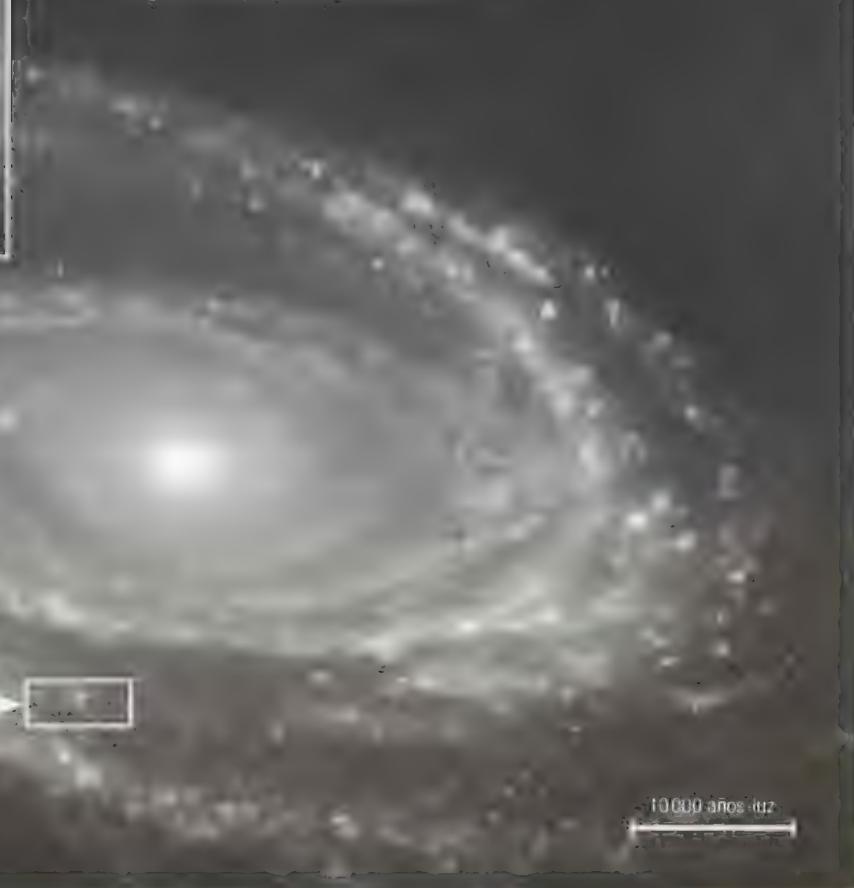


Las cefeidas son estrellas cuya luminosidad varía periódicamente, y ha podido establecerse una relación directa entre su magnitud absoluta máxima y el correspondiente periodo de pulsación. Identificada una cefeida y midido el periodo con el que su luminosidad varía, es posible obtener su magnitud absoluta y, midiendo su magnitud aparente, determinar por la misma de luminosidad a qué distancia se encuentra. La situación es comparable a la de un observador que sabe el valor en lúmenes de una lámpara situada a una distancia desconocida; por la luz que le llega de ella, podrá deducir dicha distancia.

ALGUNAS DE LAS ESTRELLAS CELESTES DE NUESTRA GALAXIA

MAPA DE LA GALAXIA

Mapa en el que se muestran las posiciones aproximadas del Sol y de algunas de las estrellas cefeadas en este sector de nuestra galaxia. Se indica también la ubicación aproximada de dicho sector en la galaxia (abajo). Las cefeadas han resultado muy valiosas para la astronomía, ya que son como hitos kilométricos de carreteras que nos indican distancias a lugares de nuestro vecindario cósmico.



Nubes de Magallanes» en el que catalogó no solo las estrellas variables, sino otras de referencia. En ese trabajo indicó: «Es importante notar que [...] las variables más brillantes tienen los períodos más largos. Es también reseñable que las que tienen los períodos más largos resultan ser tan regulares en sus variaciones como aquellas que pasan por sus cambios en un día o dos». Esta indicación fue puesta de manifiesto de manera más cuantitativa en 1912 en una circular del mismo observatorio titulada «Periodos de 25 estrellas variables en la Pequeña Nube de Magallanes». Esta circular está firmada por Edward C. Pickering (1846-1919), un astrónomo estadounidense que era entonces director del observatorio, aunque en todas las entradas bibliográficas encontradas se cita como autores de la misma a Leavitt y al propio Pickering. En cualquier caso, en esa circular se muestra de manera cuantitativa la relación entre magnitud y periodo de algunas de las variables cefeidas observadas. La importancia de estas estrellas estribaba en que, si era posible determinar su posición mediante paralaje (lo que ocurría en el caso de que estuvieran suficientemente cercanas) entonces era posible utilizarlas como *candelas estándar*, esto es como estrellas de referencia cuya magnitud o luminosidad facilitaban la determinación de distancias.

Su uso a través de la historia de la astronomía ha sido amplio. Por ejemplo, Shapley las utilizó para estimar límites para el tamaño y la forma de la Vía Láctea, así como para determinar la posición del sistema solar en la misma. Y, como ya hemos comentado, constituyeron el elemento fundamental que permitió a Hubble establecer el carácter extragaláctico de NGC 6822, M33 y M31. De hecho, en mayo de 1925 publicó un breve artículo titulado «Cefeidas en las nebulosas espirales» en el que dio cuenta de 22 variables en M33 y 12 en M31 y en el que, entre otros extremos, concluyó: «La naturaleza de la variación de las cefeidas es uniforme a lo largo de la porción observable del universo [...] Estas dos espirales [M33 y M31] no son únicas».

En septiembre de ese mismo año, en su artículo sobre la nebulosa NGC 6822, Hubble insistió: «Es de especial importancia la conclusión de que el criterio de las cefeidas funciona normalmente a esta gran distancia. Variables cefeidas se han encontra-

do recientemente en las dos nebulosas espirales más grandes, y la relación periodo-luminosidad las sitúa a distancias incluso más remotas que NGC 6822. Este criterio parece ofrecer el medio para explorar el espacio extragaláctico; NGC 6822 proporciona un test crítico de su valor para un proyecto tan ambicioso y los resultados están definitivamente a su favor».

Y, SIN EMBARGO, SE EXPANDE

El 17 de enero de 1929, Hubble envió a la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, para su publicación, un trabajo titulado «Una relación entre distancia y velocidad radial entre nebulosas extragalácticas», que hacía referencia a uno de los mayores descubrimientos de la ciencia. Tras los trabajos sobre las cefeidas, estaba en disposición de utilizar toda la información necesaria para plantear la ley que hoy día lleva su nombre y que resulta de los datos de los que disponía: distancias a 24 nebulosas y sus velocidades relativas respecto del sistema solar que ya había obtenido tiempo atrás Slipher midiendo sus correspondientes desplazamientos al rojo. Curiosamente, Hubble no citó en su trabajo a Slipher. Además, contaba con información parcial sobre otros 22 sistemas.

La figura 1 muestra los datos de las velocidades, v , en función de las distancias, r . Las líneas muestran las regresiones obtenidas en cada caso que indicarían que $v = H_0 r$, donde H_0 es la denominada *constante de Hubble* cuyo valor él estimó en unos 500 (km/s)/Mpc. El significado de la ley era más que importante: cuanto más alejada estaba una galaxia más rápidamente se alejaba.

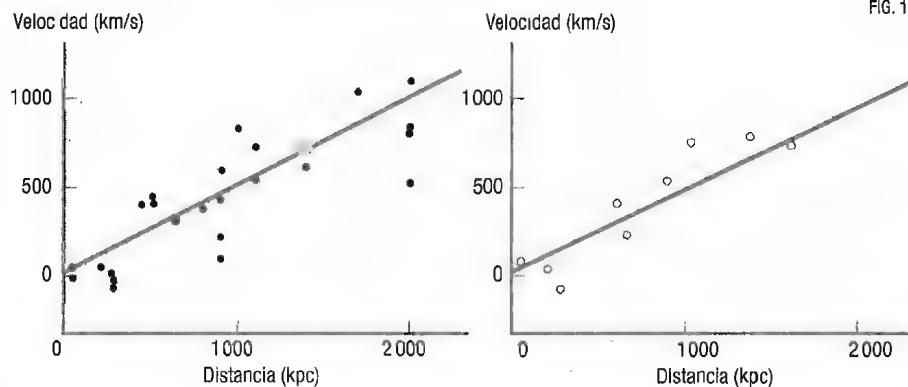
Pero la ley tenía otra implicación importante. Si se calcula la inversa de la constante de Hubble, $t_0 = 1/H_0$, tenemos una estimación de la edad del universo. El valor obtenido por Hubble daba como resultado un t_0 de unos 2000 millones de años, un valor inferior, por ejemplo, a la edad de la Tierra, lo que ponía de manifiesto una inconsistencia que no podía ser obviada. A pesar de ello, la ley fue aceptada sin demasiadas reticencias y la

expansión del universo quedó por tanto establecida sin género de dudas. Se había puesto así la primera piedra basal de lo que posteriormente se daría en llamar el Big Bang.

Algunos historiadores han puesto de manifiesto alguna reserva acerca de cómo fue posible que Hubble dedujera directamente una relación lineal a partir de sus relativamente pobres y escasos datos. Bien es verdad que cuando se observan los valores obtenidos después de agrupar las galaxias (panel derecho de la figura 1) ese comportamiento lineal parece entreverse. Pero no cabe duda que eso no ocurre cuando se analizan los datos brutos completos que se muestran en el otro panel. Para no pocos estudiosos Hubble encontró «lo que estaba buscando» y se ha dicho en este sentido que esa información la pudo obtener cuando asistió a un congreso en el que también intervinieron Lemaître, De Sitter, Shapley y Lundmark, entre otros. En una entrevista realizada alrededor de 1965 al astrónomo estadounidense Milton L. Humason (1891-1972), colaborador de Hubble, aquél explicó que «la relación velocidad-distancia empezó después de una de las reuniones de la IAU [la Unión Astronómica Internacional], creo que la que tuvo lugar en Holanda [la Tercera Sesión de la IAU se celebró en Leiden, Holanda, en julio de 1928]. El Dr. Hubble volvió a casa bastante excitado acerca del hecho de que dos o tres científicos, astrónomos, habían sugerido que cuanto menos visibles eran las nebulosas, más distantes estaban, y mayor sería el desplazamiento al rojo. Me lo contó y me preguntó que si yo podría probar y comprobarlo».

En 1931, Hubble y Humason extendieron sus datos llegando a observar galaxias que se desplazaban con velocidades de hasta unos 20 000 km/s. En su trabajo titulado «La relación velocidad-distancia entre galaxias extragalácticas», publicado en *Astrophysical Journal*, encontraron un buen comportamiento lineal pero con $H_0 = 560$ (km/s)/Mpc. Algunos historiadores opinan que la actitud que siempre mantuvo Hubble con sus resultados (nunca llegó a asumir la expansión del universo como un hecho real a pesar de las pruebas fehacientes que él mismo había obtenido) podría deberse a los valores excesivamente elevados de H_0 que daban lugar a tiempos t_0 demasiado pequeños,

FIG. 1



Adaptación de una de las figuras del trabajo de Hubble de 1929. En el panel izquierdo los puntos negros corresponden a los datos de esas 24 nebulosas de las que disponía de información fiable y el cuadrado gris representa un valor promedio obtenido para las otras 22. En el panel derecho los puntos corresponden a los datos de las 24 nebulosas fiables pero agrupándolas por grupos de acuerdo a su proximidad en dirección y distancia.

como hemos indicado antes. Lo que sí que es cierto es que con el paso del tiempo, la obtención de nuevas medidas más precisas con los telescopios espaciales, como el Hubble, ha permitido establecer un valor de $H_0 = 72$ (km/s)/Mpc. Con ese valor de H_0 , el tiempo t_0 resulta del orden de los 14 000 millones de años, valor que está de acuerdo con la edad de las estrellas más antiguas de las que se tiene conocimiento hoy día. Por otro lado, no cabe duda de que el comportamiento lineal entre la velocidad de recesión de las galaxias y su distancia al sistema solar era el correcto.

Como ya se ha indicado anteriormente, Hubble obvió en su trabajo de 1929 a otros autores que, previamente a él, habían esbozado expresiones similares a su ley aunque, eso sí, sin una confirmación experimental fiable. En este sentido es llamativo que ignorara, al menos sobre el papel, el trabajo de Lemaître de 1927, sobre todo porque ambos coincidieron en el congreso de Leiden antes mencionado. Si Hubble conocía o no ese trabajo es una cuestión que es, y probablemente será, difícil de resolver.

A esta controversia hay que añadir el hecho de que el artículo de Lemaître (escrito originalmente en francés y aparecido en una revista desconocida para los especialistas en la materia) fue finalmente traducido al inglés y publicado con la intermediación de Eddington en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Curiosamente, esa traducción no estaba completa, faltando en ella precisamente las partes en las que Lemaître establecía «su» ley de Hubble. En particular, la ecuación (24), que en el artículo original de Lemaître rezaba

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{rc} = \frac{625 \cdot 10^5}{10^6 \cdot 3,08 \cdot 10^{18} \cdot 3 \cdot 10^{10}} = 0,68 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^{-1}$$

y los párrafos previos en los que Lemaître discutía los datos astronómicos y los desplazamientos al rojo de las nebulosas que él consideró para establecer la relación de proporcionalidad entre velocidad y distancia, fueron cercenados quedando, simplemente como: «A partir de una discusión de los datos disponibles, adoptamos $R'/R = 0,68 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^{-1}$ ». De esta forma, la ecuación que mostraba explícitamente la ley de Hubble quedaba convertida en una simple ecuación numérica y toda la discusión relevante desaparecía.

Esta aparente censura fue aclarada en 2011 por el astrofísico y divulgador rumano Mario Livio que en un artículo publicado en *Nature* menciona una carta de fecha 9 de marzo de 1931, escrita por Lemaître y dirigida a William M. Smart, editor de la revista, en la que apareció la traducción:

Estimado Dr. Smart. Aprecio en alta estima el honor que es para mí [...] que mi artículo de 1927 sea reeditado por la *Royal Astronomy Society*. Le envío la traducción del artículo. Creo que no es aconsejable reimprimir la discusión provisional de las velocidades radiales, que no tiene interés en la actualidad [...] He hecho la traducción tan exacta como he podido, pero estaría encantado si alguno de ustedes tiene la suficiente amabilidad de leerla y corregir mi inglés que temo que sea demasiado burdo. [...] he encontrado

do las ecuaciones del universo en expansión mediante un nuevo método que deja clara la influencia de las condensaciones y las posibles causas de la expansión. Estaría muy contento de presentarlas a su sociedad como un artículo separado. Me gustaría mucho convertirme en un miembro de su sociedad y apreciaría que el prof. Eddington y usted me presenten.

Evidentemente, Lemaître estaba entonces ya preocupado por desarrollar su modelo del átomo primigenio y no le importaba tanto el hecho de la expansión del universo como de las causas que la iniciaron. Aparentemente no estaba obsesionado con la idea de aclarar quién había sido *de facto* el primero en establecer la relación velocidad-distancia, dado que el artículo de Hubble de 1929 ya había sido publicado y era de dominio público. Sin embargo, en 1950 volvió a referirse a su trabajo de 1927 en los siguientes términos:

... Mientras que mi bibliografía matemática presentaba serias faltas ya que no conocía el trabajo de Fridman, estaba perfectamente al día desde el punto de vista astronómico. Yo calculé el coeficiente de expansión (575 km por segundo por megapársec, 625 con una corrección estadística cuestionable). Por supuesto, antes del descubrimiento y estudio de los agregados de nebulosas, no era posible establecer la ley de Hubble, sino solo calcular su coeficiente. El título de mi nota no deja duda sobre mis intenciones: «Un universo con una masa constante y un radio creciente como explicación de la velocidad radial de las nebulosas extragalácticas». Lamento que todo esto sea demasiado personal. Pero [...] «la historia de esta competición científica no es irrelevante» y es útil resaltar los detalles para permitir una comprensión exacta del alcance del argumento que se puede establecer de ello.

No parece que, de todas formas, Lemaître estuviera por la labor de dejar que su notable logro de 1927 se viera completamente perdido.

En definitiva, la historia ha atribuido a Hubble el descubrimiento de la expansión del universo cuando él se mostró siem-

pre muy escéptico al respecto y pensó hasta su fallecimiento que los desplazamientos al rojo observados eran consecuencia de un efecto Doppler real, debido a que las galaxias presentaban una velocidad radial de recesión propia. En su libro *El reino de las nebulosas*, publicado en 1936, Hubble solo se refiere a la expansión de pasada en el último capítulo. Y algún tiempo después indicó: «Bien, quizás las nebulosas están todas en recesión de esa peculiar forma. Pero la noción es bastante sorprendente». Pero en ningún momento dejó de defender la autoría de su ley y en una carta suya dirigida a De Sitter con fecha 21 de agosto de 1930 dice: «Yo considero la relación de la velocidad-distancia, su formulación, comprobación y confirmación como una contribución de Monte Wilson y estoy profundamente preocupado de su reconocimiento como tal».

LA RADIACIÓN FÓSIL

A principios de 1965, la antena de radio que la compañía Bell Telephone había construido unos años antes en Holmdel (Nueva Jersey) fue parcialmente desarmada para limpiar los excrementos de algunas palomas que habían anidado en ella. Esta gran antena de aluminio de 15 m de longitud y una apertura de $6 \times 6 \text{ m}^2$, con forma de cuerno, tenía por misión dar soporte al Proyecto Eco, en el que señales de radio eran enviadas desde un punto de la Tierra a otro tras reflejarlas en grandes globos de plástico aluminizado en órbita alrededor del planeta. Dadas sus características, dos radioastrónomos estadounidenses, Arno A. Penzias, de origen alemán, y Robert W. Wilson, se plantearon utilizar la antena para detectar las ondas de radio provenientes de la Vía Láctea.

Arno A. Penzias había nacido en 1933 en Múnich (Alemania). En 1940 emigró junto a sus padres, asentándose en Nueva York. Se graduó en física en 1954 en el *City College* de esa ciudad y obtuvo el doctorado en 1961 en la Universidad de Columbia. Robert W. Wilson nació en Houston en 1936. Tras graduarse en física, en la Universidad Rice, en 1957, continuó sus estudios en el Instituto Tecnológico de California, donde se doctoró en 1962. Tras culmi-



Arriba, Arno A. Penzias (izquierda) y Robert W. Wilson, los dos radioastrónomos que captaron la radiación de fondo de microondas procedente del universo primitivo con la ayuda de la antena de cuerno de 15 m de la Bell Telephone (abajo). Su descubrimiento les reportó el premio Nobel de Física en 1978.

nar sus respectivos doctorados, ambos fueron contratados por la compañía Bell Telephone para su laboratorio de Nueva Jersey.

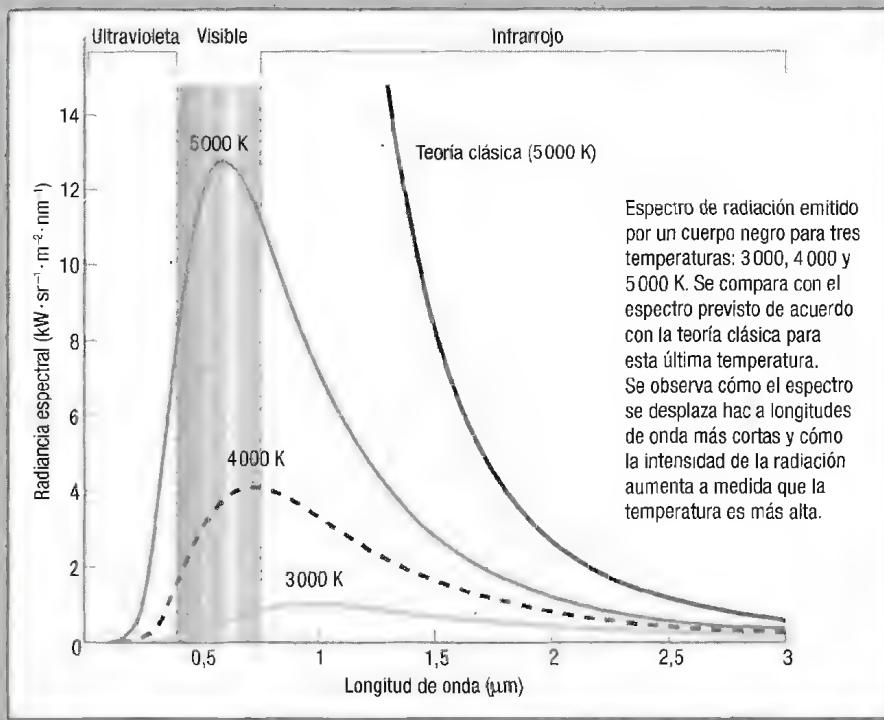
La tarea que se habían planteado Penzias y Wilson era, sin embargo, ardua, ya que las ondas de radio emitidas por las fuentes astronómicas se registran como un ruido que es difícil de diferenciar del propio ruido producido en la antena por los electrones que se mueven aleatoriamente dentro de su estructura, del que se produce en el amplificador de la antena o del proveniente de la atmósfera terrestre.

Tras descontar el ruido debido al amplificador, mediante un método que se denomina de *carga en frío*, midieron la radiación correspondiente a 7,35 cm. La emisión de nuestra galaxia es prácticamente despreciable en esa longitud de onda, de manera que las únicas contribuciones serían entonces las debidas a la estructura de la antena y a la atmósfera. Como esta presenta una dependencia característica con la dirección de observación, era fácil descontarla y poder así comprobar la importancia de aquella, que se presuponía muy pequeña, casi despreciable. Sin embargo, Penzias y Wilson encontraron que la cantidad neta de ruido detectado para esos 7,35 cm no solo no era pequeña, sino que era independiente de la dirección de medida o de la hora del día o de la estación del año en la que se realizara. Era evidente que el origen de esa radiación no podía ser nuestra galaxia porque, si ese fuera el caso, otras grandes galaxias cercanas también la emitirían y no había habido trazas de ello hasta ese momento. Entonces fue cuando pensaron si no serían las palomas las responsables de aquella señal espuria. Pero tras llevar a cabo la limpieza solo consiguieron que el nivel del ruido disminuyera una cantidad mínima, alcanzando una temperatura equivalente de entre 2,5 y 4,5 K (kelvins).

En una conversación con su amigo Bernard F. Burke, un radioastrónomo estadounidense, Penzias supo que unos físicos teóricos de la Universidad de Princeton estaban estudiando los niveles de radiación que podrían existir en el universo actual partiendo de la que habría habido en el universo primitivo. Uno de ellos, Philip J.E. Peebles (1935), había indicado en una charla que esa radiación remanente debía tener una temperatura equivalen-

TEMPERATURA Y RUIDO DE UNA RADIACIÓN

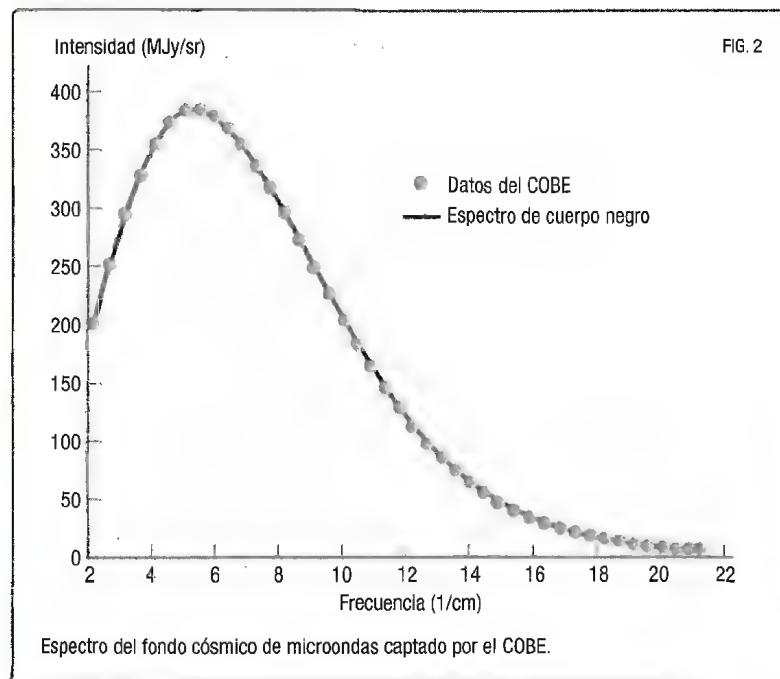
Los ingenieros radioeléctricos miden la intensidad del ruido que produce una radiación en términos de una *temperatura equivalente*. Todo cuerpo que se encuentre a una temperatura distinta del cero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$) da lugar a un ruido radioeléctrico. Esto se debe a que los electrones de los átomos del material que conforma el cuerpo se mueven por efecto térmico. Si suponemos una caja de paredes opacas que calentamos a cierta temperatura, la intensidad del ruido radioeléctrico que podemos detectar en su interior y que emite la caja dependerá de la temperatura que hayan alcanzado sus paredes. Y eso ocurre a cualquiera de las longitudes de onda emitidas. Esas es precisamente la temperatura equivalente antes mencionada. Una caja como la descrita se comporta como un *cuerpo negro*, un sistema ideal que absorbe toda radiación que incide sobre él pero que, a su vez, emite radiación electromagnética según su temperatura, de acuerdo con la denominada *ley de Planck*. A medida que aumenta la temperatura aumenta la intensidad de la radiación emitida y el máximo del espectro se va desplazando hacia longitudes de onda más cortas o, lo que es lo mismo, frecuencias más altas. Recordemos que la frecuencia f de la radiación electromagnética está relacionada con su longitud de onda λ de acuerdo a la relación: $f=c/\lambda$, siendo c la velocidad de la luz en el vacío.



te del orden de unos 10 K y, además, señaló que la abundancia de hidrógeno observada solo podría explicarse si el universo primitivo hubiese contenido una enorme cantidad de radiación con temperatura equivalente muy elevada. La expansión del universo habría ido enfriando progresivamente esa radiación hasta alcanzar esos 10 K mencionados (o algo menos de acuerdo a cálculos más precisos que Peebles y otros colegas realizaron más adelante).

La idea de realizar estos cálculos, la había sugerido a los teóricos de Princeton un físico experimental de la misma universidad: el estadounidense Robert H. Dicke (1916-1997). Especulando acerca de la posibilidad de detectar alguna *radiación fósil* del universo primitivo, inició una serie de experimentos junto con dos de sus colaboradores, David T. Wilkinson y Peter G. Roll, en los que usaron una pequeña antena con muy bajo nivel de ruido: si Dicke estaba en lo cierto, ese tipo de radiación provendría de cualquier dirección por igual y no debería ser necesario por tanto utilizar una antena de grandes dimensiones. Pero Penzias, animado por Burke, llamó a Dicke y este, tras la conversación, les dijo a los suyos: «Chicos, se nos han adelantado». Después de reunirse todos decidieron enviar a publicar a *Astrophysical Journal* dos cartas separadas que aparecieron publicadas una detrás de la otra en el mismo número de la revista y en las que se agradecen mutuamente las discusiones llevadas a cabo. En la primera, titulada «Radiación cósmica de cuerpo negro», Dicke, Peebles, Roll y Wilkinson dan una explicación cosmológica al resultado de Penzias y Wilson, que es documentado en la segunda de las cartas mencionadas, mucho más breve que la primera, y titulada «Una medida de un exceso de temperatura de antena a 4080 Mc/s». El valor mencionado, 4080 Mc/s, es la frecuencia correspondiente a la longitud de onda de 7,35 cm a la que realizaron sus medidas (aquí la unidad empleada, «Mc/s», es el megaciclo por segundo, que hoy sería MHz en unidades del Sistema Internacional). Es interesante señalar que Dicke y colaboradores indican: «Aparentemente, con la suposición de la relatividad general y una temperatura primordial consistente con los actuales 3,5 K, nos vemos forzados a adoptar un espacio abierto, con muy baja densidad. Esto elimina la posibilidad de un universo

FIG. 2



oscilante». Por su parte, Penzias y Wilson no hacen referencia alguna a las posibles implicaciones de sus medidas y se limitan a indicar que «una posible explicación al exceso de la temperatura del ruido observado es la que dan Dicke, Peebles, Roll y Wilkinson en una carta que acompaña a esta en este mismo número».

El descubrimiento de la radiación del fondo cósmico de microondas les valió a Penzias y a Wilson el premio Nobel, que les fue concedido en 1978 y que compartieron con el físico ruso Pyotr L. Kapitsa (1894-1984), galardonado por sus inventos básicos y descubrimientos en el área de la física de bajas temperaturas. Un año antes se les había otorgado la medalla Henry Draper por parte de la Academia Nacional de Ciencias estadounidense.

Hasta hoy día, la radiación del fondo cósmico de microondas se ha podido observar a varias longitudes de onda. La figura 2 muestra el resultado de las medidas realizadas en el experimento FIRAS llevado a cabo en el satélite COBE (*COsmic Background*

Explorer). Como se observa, esas medidas coinciden perfectamente con la radiación de cuerpo negro para la temperatura de $2,725 \pm 0,001$ K. Esta es pues la temperatura de la radiación del fondo cósmico de microondas actualmente aceptada.

EL CURIOSO CASO DEL CN

En la constelación de Ophiuco se localizan algunas de las estrellas más próximas a nuestro sistema solar. Una de ellas, la estrella de Barnard, está situada a tan solo 6 años-luz de distancia y tiene la particularidad de ser la que presenta, vista desde la Tierra, un mayor movimiento aparente (con 10,3 segundos de arco por año). Por otro lado, fue en esta constelación donde se observó la supernova SN 1604, también conocida como *supernova de Kepler*, la última que ha sido detectada en nuestra galaxia. Sin embargo, la estrella que ahora nos interesa es la denominada ζ Ophiuchi (véase la imagen de la página contigua), la tercera más brillante de Ophiuco. Entre ella y la Tierra se sitúa una nube de gas interestelar de manera que en su espectro de absorción aparecen líneas negras en las longitudes de onda correspondientes a excitaciones de las moléculas que componen la nube de gas (las moléculas absorben los fotones de la longitud de onda necesaria para excitarse, fotones que no llegan al detector). Una de esas líneas se encuentra a 3875 Å (1 Å, o ångström, equivale a 100 milonésimas de centímetro) y es característica de la molécula CN, que se conoce como *cianógeno*. Dos astrónomos, el canadiense Andrew McKellar (1910-1960), en el Observatorio Astrofísico de Dominion (Canadá), y el estadounidense Walter S. Adams (1876-1956), en Monte Wilson, descubrieron en 1940 y 1941, respectivamente, que en realidad se observan tres líneas en lugar de una y que aparecen para longitudes de onda de 3874,61, 3875,76 y 3874,00 Å. Para poder explicar estas líneas hay que tener en cuenta los estados en los que pueden encontrarse las moléculas de CN. Así, la primera de ellas corresponde a una transición en la que la molécula pasa de su estado más bajo de energía (el estado fundamental) a otro excitado con la energía adecuada, esto



La estrella más brillante en el sector central de la imagen es ξ Ophiuchi. La foto fue tomada en la banda infrarroja por el satélite astronómico WISE de la NASA.

Los cambios raras veces son cómodos.

ARNO PENZIAS

es unos 3,20 eV (electronvoltios) por encima del fundamental. Sin embargo, la única forma de poder explicar las otras dos líneas es suponer que las moléculas de CN no se encuentran en

su estado fundamental cuando son excitadas por los fotones que llegan de la estrella sino que, por alguna razón, en ese momento están en un estado que se encuentra a una energía ligeramente por encima de la del estado fundamental, a unos 0,00047 eV. Utilizando las intensidades de las líneas de absorción, así como las diferencias de energías mencionadas, McKellar pudo determinar que las moléculas de CN debían encontrarse sometidas a algún tipo de radiación con una temperatura característica de entre 2,1 y 2,7 K. Habían observado indirectamente el fondo de radiación cósmica de microondas, pero ninguno de ellos, sin embargo, dio importancia al hallazgo ya que su interés fundamental residía en estudiar la composición de los distintos sistemas celestes.

LOS RAYOS CÓSMICOS DE LEMAÎTRE

Después de proponer su modelo del átomo primigenio, Lemaître buscó evidencias experimentales que apoyaran su hipótesis. Era consciente de que sin tales evidencias su hipótesis no sería creíble para sus colegas astrónomos y cosmólogos. Con buen criterio pensó que si fue verdad que el universo se encontró en algún momento del pasado remoto en un estado en el que se hallaba sometido a muy altas presiones y temperaturas, deberían existir restos detectables de tal estado y fijó su atención en los rayos cósmicos. Es esta una radiación de alta energía producida fuera del sistema solar y que fue descubierta a principios del siglo xx. En su descubrimiento cabe destacar tres físicos relevantes: el alemán Theodor Wulf (1868-1946), el italiano Domenico Pacini (1878-1934) y, sobre todo, el estadounidense Victor F. Hess (1883-1964), austriaco de origen. Hess llevó varios electrómetros de precisión a 5300 m de altura mediante globos y comprobó un incremento en un factor de 4 en la tasa de ionización producida

por la radiación. Para asegurarse de que no era el Sol la fuente de radiación adicional, hizo alguno de sus experimentos aprovechando un eclipse total, concluyendo acertadamente que «una radiación con un poder de penetración muy grande entra en nuestra atmósfera desde arriba». Hess obtuvo el premio Nobel de Física en 1936 por este descubrimiento.

En una de sus conferencias ante la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, Lemaître avanzó la hipótesis de que los rayos cósmicos, entonces aún no muy bien conocidos, se habrían originado en la desintegración del átomo primigenio aunque no directamente: la desintegración primaria habría dado lugar a la creación, 10 000 millones de años atrás, de «estrellas atómicas» con masa comparable a la de las estrellas actuales y la ulterior desintegración de aquellas habría dado lugar a la materia ordinaria tal y como la conocemos hoy día y, también, a los rayos cósmicos. «Los rayos cósmicos serían destellos de los fuegos artificiales primigenios de la formación de una estrella a partir de un átomo, que llegan a nosotros después de su largo viaje a través del espacio libre», había dicho en alguna ocasión. Pero al igual que las radiaciones ionizantes emitidas en los procesos de desintegración radiactiva, Lemaître pensaba que los rayos cósmicos provenientes de su átomo primigenio debían tener no solo fotones, sino también electrones, partículas alfa y puede que incluso «partículas de mayor masa y carga». Como en el caso de la teoría del átomo primigenio, esta hipótesis de Lemaître tuvo un cierto impacto en la opinión pública y así el periódico *The New York Herald Tribune* publicó en septiembre de 1933 una noticia en la que indicaba que «Lemaître, el del universo en expansión, [...] ha relacionado los rayos cósmicos con el nacimiento del universo y el principio del tiempo».

Pero su aceptación entre la comunidad científica fue casi inexistente. Y a medida que el conocimiento sobre la composición y características de los rayos cósmicos fue creciendo, se fue haciendo cada vez más patente que no podían ser consecuencia de un estallido radiactivo ocurrido mucho tiempo atrás. Pero Lemaître siguió insistiendo en su idea hasta la década de 1950. En un artículo titulado «Aplicaciones cosmológicas de la relati-

vidad» que se publicó en *Reviews of Modern Physics* en 1949, se reafirmó en que «Todos los tipos de materia deben estar presentes en los rayos cósmicos y la materia no es nada más que rayos cósmicos condensados». Lemaître estaba en lo cierto: debía haber un remanente de radiación proveniente de los instantes iniciales del universo. Sin embargo, erró en asociar esa radiación con los rayos cósmicos, a pesar de que también era acertada su convicción acerca de la presencia de partículas cargadas con masa en la composición de los mismos.

Con el paso del tiempo, en 1978, Penzias y Wilson recibieron el premio Nobel de Física por su descubrimiento del fondo de radiación cósmica de microondas. No obstante, tal vez por desconocimiento, no se hicieron eco de las teorías que, como la de Lemaître, habían avanzado la hipótesis de la presencia de una radiación fósil. Como había indicado Peebles, la abundancia relativa de hidrógeno (y también la de otros elementos ligeros como el helio) en el universo desempeñaba un papel fundamental en las propiedades de esa radiación remanente. Sin embargo, tampoco reconocieron los trabajos que unos años antes habían llevado a cabo otros investigadores tratando de explicar esas abundancias relativas y que fueron los que, en definitiva, dieron lugar a la teoría del Big Bang.

La abundancia de los elementos

El estudio de cuán abundantes son los elementos químicos en la naturaleza constituye uno de los paradigmas de cómo una investigación llevada a cabo con una intención dada acaba produciendo resultados extraordinarios en otro contexto.

Fue precisamente este estudio el que dio pie a la formulación del Big Bang y, sobre todo, a que se acuñara el nombre con el que hoy lo conocemos.

En abril de 1948, Ralph A. Alpher (1921-2007), de la Universidad Johns Hopkins, Hans A. Bethe (1906-2005), de la Universidad de Cornell, y George A. Gamow, de la Universidad George Washington, publicaron en *Physical Review* un artículo titulado «El origen de los elementos químicos». Alpher era estudiante de doctorado de Gamow y en el trabajo que se describe solo habían participado ellos dos. Bethe no había intervenido en ninguna parte de la investigación ni de la redacción del artículo y, por otra parte, no sabía nada al respecto. Gamow, un bromista empedernido, quiso incluirlo como coautor porque de esa forma las iniciales de los autores, Alpher, Bethe y Gamow, serían las mismas que las de los tres procesos básicos de emisión radiactiva conocidos, α - β - γ , que coinciden también con las tres primeras letras del alfabeto griego. Y ello le resultaba especialmente divertido a Gamow. Cuando propuso la broma a Alpher, este no estuvo de acuerdo. Como estudiante que era, y con buen criterio, pensó que si Bethe, entonces ya un físico de gran reputación, figuraba como coautor del artículo, le adjudicarían casi todo el mérito cuando, en realidad, aquel era el trabajo de su tesis doctoral que, de hecho, defendió poco después. Pero Alpher, al

que todos los que lo conocieron califican como una buena persona, aceptó finalmente la proposición de Gamow. Al enterarse más tarde, Bethe encajó con buen humor la chanza. La teoría desarrollada en el artículo cayó sin embargo en el olvido y Gamow comentó que a la vista de los resultados «el Dr. Bethe había pensado seriamente cambiar su apellido por el de Zacharias». El artículo en cuestión es conocido entre los especialistas como el «artículo $\alpha\beta\gamma$ ». Pero Gamow no tuvo bastante. A Robert Herman (1914-1997), otro físico que colaboraba con Alpher y con él, le propuso que cambiara su apellido por el de Delter, lo que le permitiría continuar el juego con la letra δ . Pero Herman no lo hizo. Sin embargo, en un artículo titulado «Sobre cosmología relativista» que apareció en 1949 en un número especial de *Review of Modern Physics* dedicado al 70.^º cumpleaños de Einstein, Gamow escribió: «La teoría de la captura neutrónica del origen de las especies atómicas recientemente desarrollada por Alpher, Bethe, Gamow y Delter sugiere que...». Evidentemente, no había parado de maquinar.

GAMOW

George A. Gamow había nacido en 1904 en Odesa y estudió primero en la Universidad de Novorossia y después en la de Petrogrado. A partir de 1922 coincidió allí con Dmitri D. Ivanenko y Lev D. Landáu, con los que empezó a estudiar la nueva teoría cuántica que estaba desarrollándose entonces. En 1928 fue enviado al Instituto de Física Teórica en Gotinga, que en ese momento dirigía el físico alemán Max Born y que era uno de los centros de encuentro de los especialistas de la nueva física como el alemán Werner K. Heisenberg, el húngaro Eugene P. Wigner, el británico Paul Dirac, el austriaco Wolfgang E. Pauli y el italiano Enrico Fermi, entre otros. Gamow tenía una cierta aversión a los cálculos matemáticos complicados y cuando llegó a Gotinga el interés se centraba en los complejos espectros de excitación atómicos y moleculares por lo que decidió buscar un tema de trabajo más simple. De resultas fue capaz de desarrollar la teoría de la desin-

tegración alfa, que explicaba los resultados experimentales mediante el efecto túnel, un efecto puramente cuántico.

Gamow trabajó en física nuclear hasta finales de la década de 1930 y durante períodos más o menos largos estuvo en Copenhague, con Niels H.D. Bohr, en Cambridge, con Ernest Rutherford, y en París, con Marie Curie (Maria S. Skłodowska-Curie), antes de recalcar finalmente en 1934 en la Universidad George Washington, donde colaboró durante los primeros años con Edward Teller. Cuando, de nuevo, los cálculos en física nuclear empezaron a complicarse, Gamow se interesó por la producción de energía en las estrellas, campo en el que aplicó todos sus conocimientos sobre desintegración radiactiva y realizó algunas contribuciones importantes. Él fue el organizador de la famosa conferencia de Washington de 1938 en la que propició el encuentro entre astrofísicos y físicos nucleares bajo el título «Energía estelar y procesos nucleares». En esa conferencia, Bethe tuvo conocimiento del *ciclo p-p*, una reacción de fusión nuclear responsable de la producción de energía en algunas estrellas. Charles L. Critchfield (1910-1994), un estudiante de doctorado de Teller, lo había propuesto inicialmente y lo discutió con Bethe quien realizó los cálculos detallados para, seguidamente, encontrar y proponer un segundo ciclo, el *C-N-O*. Bethe publicó con Critchfield un primer artículo titulado «La formación de deuterones por combinación de protones», aparecido en *Physical Review* en 1938, y un segundo, en solitario y en la misma revista, bajo el título de «Producción de energía en estrellas», en 1939, y ambos trabajos le valieron el premio Nobel en 1967.

Gamow continuó involucrado en problemas de evolución estelar hasta la mitad de la década de 1940, cuando cambió de nuevo sus objetivos científicos para dedicarse de lleno a la cosmología física. Sin embargo, no era este un territorio totalmente desconocido para él ya que cuando era estudiante en la Universidad de Leningrado había estado interesado en la teoría de la relatividad general de Einstein. Fridman fue profesor suyo en un curso sobre «Fundamentos matemáticos de la teoría de la relatividad» que Gamow siguió con gran interés dadas sus dificultades

No importa cuánto te agrade una teoría: si los resultados experimentales la refutan, habrá que arrojarla a la basura.

GEORGE GAMOW

con la fundamentación matemática. Gamow estaba dispuesto a trabajar con Fridman en problemas de cosmología, pero la prematura muerte de este no le permitió hacerlo.

No obstante, Gamow no olvidó completamente la cosmología y en

1937 impartió un curso en la Universidad de Washington sobre la teoría de la relatividad y su conexión con ella. El interés último de Gamow era entender cómo, dónde y en qué circunstancias se produjeron los elementos químicos con el fin de poder describir la abundancia relativa de los mismos que era experimentalmente observada. Esto lo había puesto de manifiesto dos años antes en una conferencia que impartió en la Universidad de Ohio. Y en abril de 1942, en el documento de conclusiones de la octava conferencia de Washington, que tuvo por título «Evolución estelar y cosmología», puede leerse: «Parece por tanto más plausible que los elementos se originaron en un proceso de carácter explosivo que tuvo lugar al “principio del tiempo” y dio lugar a la actual expansión del universo». Estas conclusiones las redactaron Gamow y John A. Fleming, un geofísico colega suyo en Washington. De nuevo una mención a un evento explosivo primigenio. Como en el caso de Lemaître, pero sin ninguna mención a sus trabajos.

La idea en este contexto no era sin embargo nueva. En 1938, Von Weizsäcker había publicado en *Physikalische Zeitschrift* un trabajo titulado «Sobre transmutaciones de elementos en estrellas» en el que discutía los ciclos de producción de energía antes mencionados y en el que especulaba sobre la misma idea de Gamow y Fleming. Tanto en el trabajo de Von Weizsäcker como en el de Bethe de 1939 antes citado, se concluía que no era posible que en las estrellas se produjese cantidades apreciables de elementos más pesados que el helio. Bethe, que se centraba en su artículo en el cálculo detallado de la producción de energía en las estrellas, creía que los elementos pesados debían haberse formado con anterioridad a que las estrellas alcanzasen el estado de presión y temperatura que asumía para sus cálculos. Por su parte Von Weizsäcker proponía los ciclos de producción de

energía basándose en argumentos más cualitativos que los esgrimidos en los cálculos de Bethe, pero además especulaba sobre un estado inicial del universo que respondería a una agregación primigenia de materia, formada quizá por hidrógeno, que colapsaría por la influencia de la gravedad hasta alcanzar las condiciones extremas (una temperatura de 10^{11} K y una densidad próxima a la del núcleo atómico) que habrían permitido la formación de los distintos elementos. El trabajo de Von Weizsäcker debe pues considerarse como uno de los primeros intentos de dar una explicación física del origen del universo.

Sin embargo, en 1942 la conclusión de la conferencia de Washington estaba mucho mejor justificada: la existencia de los elementos pesados requería el evento marcado por la explosión inicial. De alguna manera, los astrofísicos nucleares se habían convencido de que las estrellas no proporcionaban el escenario adecuado para producir elementos pesados y, de forma natural, trasladaron su atención a otra de las pocas opciones que tenían para explicar las abundancias relativas, quizás la única razonable: un universo con condiciones extremas en su origen.

No obstante, la confluencia entre física nuclear y cosmología no era tan simple en aquel momento. En el caso de Gamow, por ejemplo, la visión interdisciplinar del problema no la atisbió hasta 1945. En una carta que envió a Bohr para felicitarle por su 60.^o aniversario decía: «... Sería muy agradable si el final de la guerra significara la vuelta a la vida pacífica tal y como era hace quince años [...] ¡Pero sería realmente muy agradable si uno pudiera comenzar a trabajar de nuevo en ciencia pura sin las pesadas nubes que cuelgan del aire! Es lo que estoy tratando de hacer ahora estudiando el problema del origen de los elementos en las etapas iniciales del universo en expansión. Eso significa unir las fórmulas relativistas para la expansión y las tasas de reacciones termonucleares y de fisión. Un punto interesante es que el periodo de tiempo durante el que tuvo lugar la fisión original [...] debe haber sido menor de un milisegundo, mientras que solo una décima de segundo estuvo disponible para establecer el subsiguiente equilibrio termodinámico (si lo hubo) entre los diferentes núcleos ligeros...».

Gamow tardó un año todavía en dar a luz un resultado desde este nuevo punto de vista y no fue hasta 1946 cuando publicó en *Physical Review* un artículo de apenas dos páginas titulado «Universo en expansión y el origen de los elementos». Pese a su brevedad algunos historiadores de la ciencia consideran que este fue el trabajo que dio lugar al cambio hacia la moderna cosmología. En él Gamow propugnaba que el universo inicial habría estado formado por un gas de neutrones, de alta densidad, que habría dado lugar a la formación de estructuras complejas neutras, más o menos grandes, que a su vez darían lugar a las distintas especies atómicas a través de desintegraciones β sucesivas. Aunque Gamow no lo indicó explícitamente en ese trabajo, su hipótesis se basaba en la relevancia que los procesos de captura neutrónica debían haber tenido en la producción de elementos en los estadios iniciales de la evolución del universo.

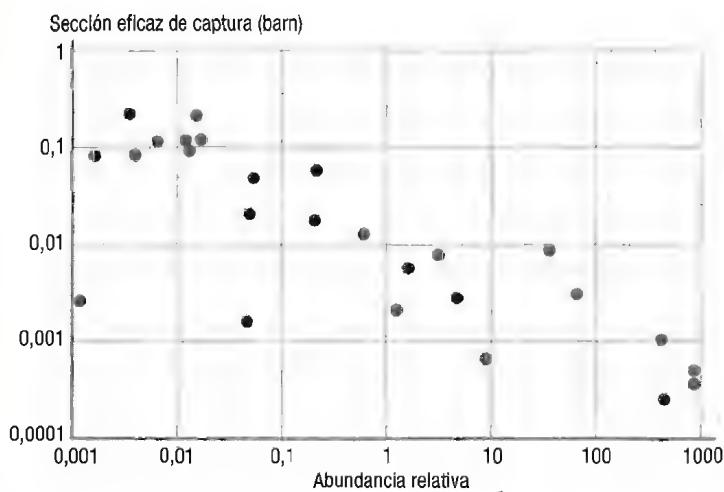
EL ARTÍCULO $\alpha\beta\gamma$

En 1946 Alpher empezó a trabajar con Gamow. Hijo de emigrados rusos judíos, nacido en Washington, había estudiado en la misma universidad en la que Gamow prestaba servicio y tras graduarse había obtenido, en 1941, un puesto para hacer el doctorado en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins en Maryland. Sin embargo, al cabo de un año descubrió que el tema de tesis que le habían propuesto ya estaba publicado, por lo que tuvo que buscar otro camino. Contactó entonces con Gamow, lo que resultó un golpe de fortuna para ambos. Para Alpher porque le garantizaba su objetivo de culminar su doctorado y para Gamow porque Alpher era un buen conocedor de las técnicas matemáticas que tantos problemas le causaban.

El tema que Gamow sugirió fue el análisis detallado de la distribución de elementos en el universo a la luz de su modelo recién formulado sobre el estado inicial de este último. Este estudio requería disponer de información experimental fiable sobre las secciones eficaces (probabilidad de interacción entre dos partículas) de los procesos de captura de neutrones para el

mayor número de núcleos que fuera posible. Disponer de datos sobre esas secciones eficaces era también importante para poder establecer los materiales más adecuados para la construcción de reactores nucleares así como las características geométricas de sus elementos constructivos. En la reunión anual de la *American Physical Society* de aquel año, Donald J. Hughes (1915-1960), un físico nuclear estadounidense, presentó una colección de esos datos para varias especies nucleares. Alpher era uno de los asistentes al congreso y en cuanto volvió a Maryland hizo un sencillo ejercicio: representó las secciones eficaces de Hughes frente a las abundancias relativas de los elementos en el universo que en 1938 había publicado el geoquímico suizo Victor M. Goldschmidt (1888-1947). Hizo la gráfica considerando la escala logarítmica para ambas cantidades y encontró resultados reveladores: los dos conjuntos de datos mostraban una más que evidente correlación lineal (figura 1); es decir, que Gamow estaba en lo cierto.

FIG. 1



Alpher, en un trabajo de 1948, comparó las secciones eficaces de captura neutrónica de varios isótopos con la abundancia relativa de los correspondientes elementos y encontró una clara correlación entre ambas.

El verano de 1948 Alpher pudo finalmente defender su tesis doctoral en un acto que levantó una inusual expectación entre los no expertos. Aunque su trabajo tenía por objeto discutir sobre la *nucleosíntesis*, algunos lo relacionaron directamente con la creación del mundo. Como ya ocurriera en su día con Lemaître, el interés mediático se disparó y, al parecer, más de 300 personas asistieron a la disertación de Alpher.

Justo antes de presentar su tesis doctoral, Alpher escribió con Gamow el famoso artículo $\alpha\beta\gamma$ antes mencionado. Dejando a un lado la componente jocosa, la relevancia del trabajo estriba en que establece una nueva imagen del universo en sus estadios iniciales. Tal y como Alpher describió en un trabajo publicado en 1948 en *Physical Review* y titulado «Una teoría basada en captura neutrónica de la formación y abundancia relativa de los elementos»: «Enseguida tras el principio de la expansión del universo, el ylem era un gas de neutrones solo. Esos neutrones empezaron a desintegrarse en protones y electrones, siendo la densidad suficientemente baja para permitir la desintegración libre de los neutrones y la temperatura suficientemente alta para que la energía térmica media por neutrón fuera mayor que la energía media de enlace por nucleón en el núcleo de manera que los núcleos como tales no podían formarse. Cuando la temperatura descendió suficientemente en la expansión, comenzó la captura de neutrones por protones dando lugar a deuterones. Esos núcleos capturaron a continuación más neutrones y se fueron creando sucesivamente núcleos más pesados. Los núcleos creados de esta forma tenían un gran exceso de neutrones y por tanto habrían sufrido las consiguientes desintegraciones β transformándose en formas estables durante, y después de, el proceso de formación de elementos. El proceso debió haber terminado por la disminución en las tasas de las reacciones de captura originadas por la reducción de la densidad en la expansión y del número de neutrones disponibles como resultado de su desintegración radiactiva».

Gamow y sus estudiantes habían recuperado una palabra en desuso para denominar a la *amalgama primigenia* en la que se habrían producido las distintas reacciones nucleares de síntesis,

el *ylem*, cuyo significado aclara Alpher en su artículo: «De acuerdo con el Nuevo Diccionario Internacional Webster's 2.^a ed., la palabra "ylem" es un nombre obsoleto que significa "La sustancia primordial de la que los elementos fueron formados". Parece muy deseable que una palabra con un significado tan apropiado sea resucitada».

LA TEMPERATURA DEL UNIVERSO EN EXPANSIÓN

Alpher colaboró desde su llegada a Maryland con Herman, que trabajaba en su mismo laboratorio. Herman era hijo también de emigrados rusos judíos, había nacido en Nueva York y se había doctorado en 1940 en la Universidad de Princeton. Aunque su tesis se había desarrollado en el campo de la espectroscopía molecular, Herman era un buen conocedor de la teoría de la relatividad y de la cosmología que había estudiado durante su carrera. Gamow los animó para que refinaran los cálculos de la tesis de Alpher y eso les permitió publicar varios artículos entre los que cabe destacar el titulado «Sobre la abundancia relativa de los elementos» que apareció en *Physical Review* a finales de 1948. En este trabajo se conseguía un buen acuerdo con un nuevo conjunto de datos experimentales sobre las abundancias relativas que había obtenido el físico y geoquímico estadounidense Harrison S. Brown (1917-1986) y que entonces aún no se había publicado.

Ya entonces, Gamow, Alpher y Herman se habían dado cuenta de que su *ylem*, un sistema que solo contenía un condensado inicial de neutrones, no era adecuado y no bastaba para poder explicar la situación que realmente se observaba. En sus cálculos habían asumido que podría encontrarse a unos 10^9 K, pero a esa temperatura en el estado inicial del universo debía haber, además de materia, radiación. Como la *ley de Stefan-Boltzmann* establece que la energía radiada por segundo y por unidad de superficie es proporcional a la temperatura elevada a la cuarta potencia, no solo debía haber radiación presente sino que debía estarlo en una cantidad tal que su densidad debía es-

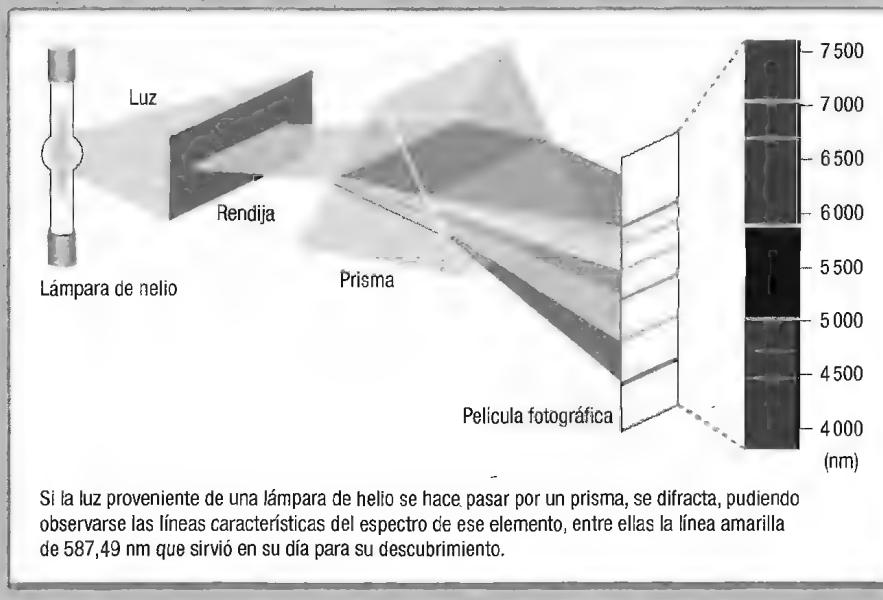
tar muy por encima de la densidad de la propia materia. Gamow tuvo en cuenta este extremo en un trabajo titulado «La evolución del universo» y que apareció publicado en *Nature* durante el verano de 1948. La presencia de esa radiación le permitió, por otra parte, argumentar que las *protogalaxias* (objetos estelares precursores de las galaxias) se habrían formado en un momento de la expansión del universo en el que la densidad de radiación fuera aproximadamente igual a la de materia, a una temperatura que se habría reducido considerablemente hasta alcanzar unos 10^3 K, aproximadamente. Alpher y Herman revisaron el manuscrito del artículo antes de que Gamow lo enviara a la revista y descubrieron algunos errores en los cálculos (cosa inevitable en el caso de Gamow). Sin embargo, prefirió no corregirlos. Lo envió tal cual estaba y convenció a sus dos colaboradores para que escribieran una nota en la misma revista incluyendo los cálculos debidamente corregidos. Y así lo hicieron en un trabajo con casi el mismo título que el de Gamow, «Evolución del universo», y que apareció publicado en el mismo número de la revista, unas cuantas páginas más adelante.

Al año siguiente, en *Physical Review*, Alpher y Herman publicaron «Observaciones sobre la evolución del universo en expansión», donde insistieron en los cálculos del otro artículo. Pero estos dos trabajos de Alpher y Herman incluían explícitamente un resultado de gran relevancia: mencionaron que la temperatura del universo actual debía ser de unos 5 K, una temperatura media que «debe interpretarse como la temperatura de fondo que resultaría solo de la expansión del universo. Sin embargo la energía térmica resultante de la producción de energía nuclear en las estrellas incrementaría este valor». En el artículo con los cálculos incorrectos, Gamow también había utilizado las mismas ecuaciones que ellos, pero él no llegó a hacer la estimación concreta de la temperatura en cuestión. De hecho, ni para Gamow ni para sus colaboradores ese valor de la temperatura de fondo tenía una especial importancia: a ellos les preocupaba la abundancia relativa de los elementos.

Pero no solo a ellos les resultó el citado resultado poco relevante ya que en los años siguientes ningún cosmólogo o astrofís-

EL DESCUBRIMIENTO DEL HELIO

El helio, cuyo nombre se debe al químico inglés Edward Frankland (1825-1899), es el elemento que en mayor cantidad se encuentra presente en el universo, después del hidrógeno. Se estima que su abundancia relativa es del 25 %. Su descubrimiento se llevó a cabo en una observación de la cromosfera del Sol durante un eclipse total en 1868. El astrónomo francés Pierre J.C. Janssen (1824-1907) detectó en el espectro de emisión una línea amarilla con una longitud de onda de 587,49 nm que en principio atribuyó al sodio. Ese mismo año, el astrónomo inglés Joseph N. Lockyer (1836-1920) detectó la misma línea en el espectro solar y dedujo que tenía que deberse a un elemento presente en el Sol y desconocido en la Tierra. Fue el vulcanólogo italiano Luigi Palmieri (1807-1896) quien primero lo detectó en la Tierra analizando la lava del Vesubio. En 1895 los químicos suecos Per T. Cleve (1840-1905) y Nils A. Langlet (1868-1936) determinaron su peso atómico tras obtener una cantidad suficiente de gas, que es el estado en el que se encuentra a temperatura ambiente. En 1908, el físico holandés Heike K. Onnes (1853-1926) consiguió producir helio líquido enfriándolo a 0,9 K, por lo que le fue concedido el premio Nobel en 1913. Ya en 1938, el físico ruso Piotr L. Kapitsa, también premio Nobel en 1978, descubrió las propiedades de superfluidez del isótopo ^3He a temperaturas cercanas al cero absoluto y hubo que esperar hasta 1972 para que los físicos estadounidenses Douglas D. Osheroff (1945), David M. Lee (1931) y Robert C. Richardson (1937-2013) descubrieran un comportamiento similar en el ^3He , por lo que recibieron el premio Nobel en 1996.



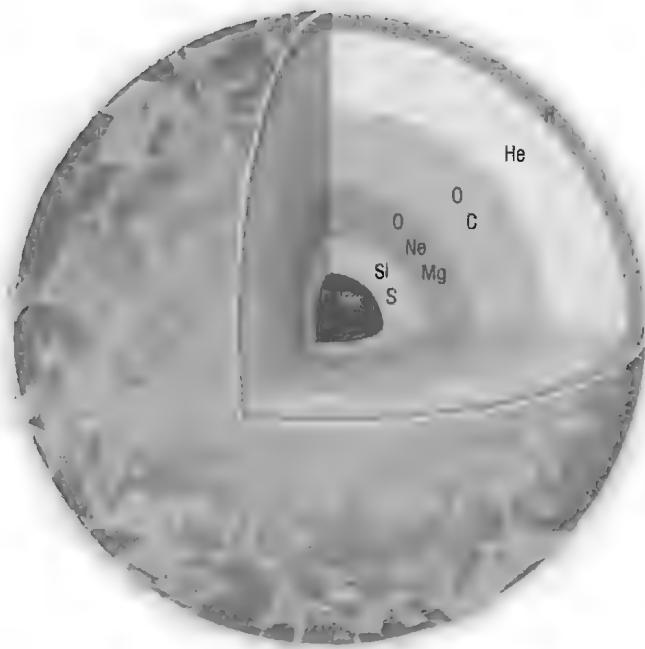
Si la luz proveniente de una lámpara de helio se hace pasar por un prisma, se difracta, pudiendo observarse las líneas características del espectro de ese elemento, entre ellas la línea amarilla de 587,49 nm que sirvió en su día para su descubrimiento.

sico se hizo eco del mismo. Tuvieron que pasar quince años para que Penzias y Wilson se toparan por accidente con el fondo de radiación cósmica de microondas que, como ya hemos comentado, habían empezado también a buscar Dicke y colaboradores. Ninguno de ellos mencionó en sus trabajos las predicciones del grupo de Gamow, que habían seguido refinando sus cálculos. Así, en 1950, Alpher y Herman obtuvieron una temperatura de 2,8 K, muy próxima al valor medido en la actualidad, y en 1953 Gamow obtuvo 7 K haciendo uso de un procedimiento novedoso y sencillo que apareció publicado en una revista danesa. Este trabajo ha tenido desde su publicación distintas controversias sobre su credibilidad, aunque hasta ahora no se han descubierto fallos en los cálculos realizados por Gamow. Años más tarde, Penzias pidió disculpas a Gamow por su olvido, pero él nunca dejó de sentir cierto malestar por ello.

Más adelante se comprendió que el modelo de Gamow, Alpher y Herman solo podía dar cuenta con fiabilidad de la formación del helio y, por tanto, de la abundancia relativa del hidrógeno y de este otro elemento ligero. El problema era que en la cadena de formación de elementos cada vez más pesados, en la que los núcleos irían capturando un neutrón en cada paso, deberían haber aparecido núcleos que en realidad no existen, algo que no tuvieron en cuenta en sus cálculos. Algunos años más tarde, en 1957, los astrofísicos Eleanor M. Burbidge (1919), Geoffrey R. Burbidge (1925-2010), William A. Fowler (1911-1995) y Fred Hoyle (1915-2001) publicaron en *Review of Modern Physics* un trabajo fundamental en el campo de la nucleosíntesis que llevaba el título de «Síntesis de los elementos en las estrellas». Este artículo, conocido por los especialistas como el B²FH (por las iniciales de los apellidos de sus autores, el matrimonio Burbidge, Fowler y Hoyle), permitió entender cuáles son los procesos responsables de la generación de los elementos más pesados, denominados por ellos *procesos r* (rápido) y *s* (lento), y que no habrían ocurrido en el Big Bang sino en las propias estrellas (figura 2) y en las supernovas.

Los trabajos de Gamow, Alpher y Herman tuvieron otra connotación muy ajena a sus intenciones. Gamow envió en 1951 una

FIG. 2



En el transcurso de su actividad normal, las estrellas son capaces de generar elementos químicos más pesados que el hidrógeno. La figura muestra la composición por capas que puede llegar a tener una estrella de gran masa en la fase final de su vida estelar, como la que se cree que pudo poseer poco antes de su final explosivo la estrella que originó el actual remanente de supernova conocido como Casiopea A (Cassiopea A). Desde el interior hacia el exterior, podemos ver un núcleo con hierro; una capa con silicio y azufre; otra con oxígeno, neon y magnesio; otra con oxígeno y carbono; otra rica en helio, y otra de hidrógeno.

copia de sus recientes artículos de divulgación al papa Pío XII. Además, en su carta le anunciaba que pronto vería la luz un libro suyo sobre *La creación del universo*. El Papa quedó entusiasmado con aquel material, tanto que en noviembre de ese año dirigió a la Academia Pontificia de las Ciencias, reunida en sesión plenaria, un discurso que tituló «Las pruebas de la existencia de Dios a la luz de la ciencia natural moderna» en el que anunció su respaldo incondicional a la teoría del Big Bang. «Cuanto más avanza la ciencia verdadera, más descubre a Dios, casi como si Él

estuviera en pie, vigilante y esperando, detrás de cada puerta que la ciencia abre», expresó al principio de su intervención, y tras un muy largo relato concluyó: «[La ciencia moderna] ha seguido el curso y la dirección de los desarrollos cósmicos y [...] ha indicado su principio en el tiempo en un periodo hace alrededor de 5 000 millones de años, confirmando con la concreción de las pruebas físicas la contingencia del universo y la deducción bien fundamentada de que alrededor de ese tiempo el cosmos salió de la mano del Creador. Creación, [...] y por tanto, un Creador y, por consiguiente, ¡Dios! Esta es la declaración, incluso aunque no explícita o completa, que demandamos de la ciencia....». Gamow, ateo declarado, no parece que hubiera prestado demasiada atención al discurso o a sus posibles implicaciones. Por otro lado, Lemaître no se encontraba a gusto con este tipo de declaraciones exacerbadas de triunfalismo religioso y, a pesar de su condición de sacerdote católico, siempre mantuvo separados el ámbito científico del religioso.

LA TEORÍA DEL ESTADO ESTACIONARIO

Cuando Gamow, Alpher y Herman propusieron su modelo, otra teoría, la del *estado estacionario*, era mayoritariamente avalada por una parte de los cosmólogos y astrofísicos. Ante la ausencia de evidencias claras que permitieran discernir cuál de las dos era la correcta, los respectivos defensores trataban de dar cuenta de los escasos datos experimentales disponibles entonces. El estado estacionario describía un universo que, a gran escala, no mostraba cambio alguno con el paso del tiempo de manera que, y eso era lo más importante, nunca lo había hecho y nunca lo haría en el futuro. Se trataba pues de un universo sin inicio ni fin, contrario por tanto a los modelos de universo con un «principio». Además se satisfacía el principio cosmológico que mencionamos en la Introducción y que asegura un universo con una distribución de materia homogénea e isótropa a escalas suficientemente grandes.

El modelo había sido originalmente propuesto por Jeans a finales de la década de 1920 y fue retomado y revisado en 1948

por los austriacos Hermann Bondi (1919-2005), cosmólogo y matemático, y Thomas Gold (1920-2004), astrofísico, e independientemente por Hoyle, en sendos trabajos publicados en 1948 en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, titulados «La teoría del estado estacionario del universo en expansión» y «Un nuevo modelo para el universo en expansión», respectivamente. Desde el descubrimiento de que el universo se encontraba, sin duda, en expansión, la principal dificultad con la que un modelo como este tenía que lidiar era que la densidad de materia promedio no podía mantenerse constante como el modelo imponía. Para remediar este problema los tres autores añadieron al modelo de Jeans una «fuente de materia», esto es, un mecanismo que creaba materia en el universo de forma continua y espontánea, pero con una tasa extremadamente pequeña, del orden de 10^{-43} g/cm³s, de manera que no podía ser detectada experimentalmente mediante ningún procedimiento conocido.

Volviendo la vista atrás no deja de ser sorprendente lo que escribiera Swedenborg en sus *Principia* en 1734, es decir, más de doscientos años antes de que el modelo del estado estacionario entrara en el juego cosmológico: «Por tanto, nuevos cielos uno tras de otro pueden surgir; en esos cielos, nuevos vórtices y sistemas-mundo; en esos sistemas-mundo, nuevos planetas; alrededor de los planetas nuevos satélites; y de esta manera, según el deseo de la Divinidad, nuevas creaciones pueden resultar en una sucesión sin fin».

BIG BANG... ¡POR FIN!

Es curioso constatar cómo muchos investigadores creen que el nombre de *Big Bang* se debe a Gamow. Nada más lejos de la realidad: a él nunca le gustó. En una entrevista que le realizó poco antes de su fallecimiento el historiador de la ciencia Charles Weiner, Gamow aclaró: «Nunca lo llamé “Big Bang” ya que es una especie de cliché. Fue inventado, creo, por los cosmólogos de la teoría del estado inmutable. Y también lo llamaban “bola de fuego”, que no tiene nada que ver con ello, no es una bola de fuego

en absoluto, no tiene relación alguna con la bola de fuego de la bomba atómica». Gamow solo utilizó el término una sola vez en un trabajo que publicó en 1961 en *Scientific American* y que se titulaba «Gravedad». En sus escritos él empleaba otras denominaciones como la *teoría de la evolución relativista* o la *hipótesis del principio*. En su libro de divulgación *La creación del universo* en el que describe con todo lujo de detalles su modelo cosmológico, habla de la *gran compresión* del universo que debió anteceder al inicio de su expansión, sin que en ningún momento mencione *Big Bang*.

No veo la lógica de rechazar datos solo porque parezcan increíbles.

FRED HOYLE

Participaba en un programa de divulgación en el que explicaba a la audiencia las cuestiones básicas de la teoría del estado estacionario, el modelo que él defendía y que se contraponía a los modelos de universo con un principio. Tratando de hacer llegar a los oyentes una imagen que describiera estos últimos, habló de «la hipótesis de que toda la materia del universo fue creada en un *big bang* en un instante particular del pasado remoto». Hoyle, que consideraba falto de lógica y poco científico un proceso como ese, concluyó su intervención en el programa diciendo: «No puedo ver ninguna buena razón para preferir la idea del Big Bang». Con el tiempo, su postura frente al modelo explosivo se fue suavizando hasta que dejó de manifestarse en contra del mismo.

Que Hoyle mencionó el «Big Bang» con tono despectivo e insultante hacia los defensores de la teoría contraria a la suya ha sido argumento de infinidad de escritos, más o menos históricos, al respecto y es una idea bien arraigada en muchos investigadores relacionados con la cosmología y la astrofísica. Sin embargo, es de recibo señalar que Hoyle negó explícitamente en muchas ocasiones que hubiera querido ser hiriente con su descripción. Es más que plausible que, simplemente, necesitado de imágenes sencillas que le permitieran transmitir a la audiencia radiofónica de la BBC los conceptos técnicos que pretendía

La denominación de *Big Bang* fue utilizada por primera vez en el contexto cosmológico en una emisora de radio de la BBC británica y su «inventor» fue Fred Hoyle. En 1949 par-

HOYLE, UN VISIONARIO CONTROVERTIDO

Fred Hoyle, quien acuñó el nombre de «Big Bang», fue un astrónomo inglés, nacido en 1915. Estudió matemáticas en la Universidad de Cambridge donde, en 1958, obtuvo la cátedra de Astronomía y Filosofía Experimental. En 1967 fue director fundador del prestigioso Instituto de Astronomía de Cambridge. Nombrado sir en 1972, año en el que renunció a su cátedra, se dedicó a escribir libros de divulgación científica y de ciencia ficción. Falleció en 2001.

Más pesados que el helio

A finales de la década de 1940, Hoyle publicó sus primeros trabajos sobre la generación de elementos más pesados que el helio en las estrellas. Su hipótesis era que los elementos entre el carbono y el hierro se producían en un estado evolucionado estelar previo al de supernova, mediante reacciones nucleares de fusión. En 1957 publicó un trabajo fundamental en el campo de la nucleosíntesis: «Síntesis de los elementos en las estrellas», junto con Eleanor M. Burbidge, Geoffrey R. Burbidge y William A. Fowler (este último ganador del premio Nobel en 1983).

Discusión sobre el Nobel

En 1974 Hoyle denunció que el premio Nobel de Física le fuera concedido a Antony Hewish, compartido con Martin Ryle, por el descubrimiento de los pulsares, que en realidad había descubierto su estudiante de doctorado Susan J. Bell Burnell. Posiblemente esta protesta hizo que él no obtuviera el mismo premio en 1983 cuando le fue concedido, compartido con Subrahmanyan Chandrasekhar, a Fowler por sus estudios de las reacciones nucleares relevantes en la formación de los elementos en el universo.



explicar, Hoyle inventara el término sobre la marcha, sin ningún ánimo peyorativo.

No cabe duda, en cualquier caso, que la invención fue más que exitosa ya que «Big Bang» es uno de los términos que más éxito han tenido en la historia de la ciencia. Su impacto en algunas de las publicaciones populares estadounidenses fue casi inmediato y el físico nuclear y astrofísico estadounidense William A. Fowler fue el primero en utilizarlo en un artículo de investigación publicado en 1957 en *Scientific Monthly* con el título «Formación de los elementos». Sin embargo, no fue hasta la década de 1970 cuando el nombre comenzó a usarse con asiduidad en cosmología.

A VUELTAS CON LA PARADOJA DE OLBERS

Como se vio en el primer capítulo, la paradoja de Olbers había sido planteada y tratada de resolver antes y después de que este médico alemán, astrónomo aficionado, la formulara. También vimos cómo las explicaciones que fueron exponiendo distintos investigadores no permitían resolverla y que, sin embargo, Poe entrevió una solución plausible.

Aunque no resolvieron el dilema, dos relevantes investigadores cuantificaron sendos aspectos fundamentales del mismo. Así, lord Kelvin, en 1901, calculó que un cielo nocturno brillante requeriría la luz de todas las estrellas situadas a una distancia de hasta 3 000 billones de años-luz. Y en 1964, Edward R. Harrison estableció que la energía necesaria para producir un cielo nocturno iluminado sería 10 billones de veces mayor que la disponible de acuerdo a las observaciones realizadas hasta ese momento.

Esta paradoja solo puede explicarse si se toman en consideración dos de los aspectos fundamentales que están presentes en la teoría del Big Bang, a saber, la expansión del universo y que este tuviera un principio. Obviamente, en la época en que el modelo del estado estacionario era el más aceptado, solo la primera de ambas razones podía argumentarse (dado que en esa teoría el universo no había tenido un principio). Así había quedado claro en un influyente libro titulado *Cosmología*, que Bondi publi-

có en 1952. Sin embargo, cuando este modelo quedó superado por el del Big Bang, la argumentación no fue revisada. Y ello ocurrió a pesar de que Harrison, en 1964, y Peebles, en 1971, e incluso el historiador de la ciencia John Gribbin, británico, en un artículo de divulgación aparecido en 1986 en *New Scientist*, habían señalado que no era suficiente la expansión del universo para dar cuenta de la paradoja. Con argumentos correctos que, curiosamente, fueron ignorados, estos autores pusieron de manifiesto que era necesario incluir también el hecho de que las galaxias, que eran las fuentes de luz que se consideraban en la formulación de la paradoja, tenían una edad finita, debido a que el universo también la tenía. Es cierto que la expansión del universo reduce la intensidad de la luz observada, ya que al crecer el volumen del espacio intergaláctico disminuye la densidad de los fotones presentes. Además, el desplazamiento al rojo asociado con la expansión reduce también la energía de esos fotones. En definitiva, la intensidad de la luz es menor a medida que la expansión «actúa». Pero la edad de las galaxias tiene también una implicación relevante en el problema. Solo podemos recibir la luz proveniente de aquellas galaxias que estén situadas a una distancia igual al producto de su edad (unos 10 000 millones de años) por la velocidad de la luz. La luz emitida por las galaxias que estén más alejadas no habrá podido llegar aún a nosotros y, por tanto, no es posible extender indefinidamente lejos una línea de luz tal y como Olbers mencionaba en su formulación de la paradoja. Es decir: la luminosidad del cielo nocturno está limitada por ambos hechos.

En 1987, los astrofísicos Paul S. Wesson, K. Valle y R. Stabell escribieron un programa de ordenador basado en la teoría general de la relatividad y con el que podían determinar la intensidad de la luz en el espacio intergaláctico y, por ende, el nivel de oscuridad del cielo nocturno. Tras realizar sendos cálculos con tasas de expansión nula y distinta de cero, respectivamente, encontraron que la *razón de intensidades* era de tan solo un 50%, por lo que pudieron deducir que el elemento relevante es la edad de las galaxias, que por sí sola sería capaz de explicar la oscuridad del cielo durante la noche.

LOS PADRES DEL MODELO

El espaldarazo a la teoría del Big Bang llegó, como se ha indicado antes, con el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas por Penzias y Wilson en 1964. Sin embargo, el primero en hablar de un estado inicial del universo y de su expansión fue Lemaître, quien tras redescubrir los resultados de Fridman, relacionó las soluciones que predecían la expansión del universo con los desplazamientos al rojo experimentales entonces existentes. Y poco tiempo después sugirió por primera vez un estado inicial del universo que habría explosionado dando lugar al inicio del tiempo y a la expansión del universo. Lemaître, con su «átomo primigenio», puede considerarse por tanto como uno de los padres de la teoría del Big Bang.

Los otros fueron, sin duda, Gamow y sus estudiantes Alpher y Herman. Siguiendo un camino bien distinto al de Lemaître y poniendo su interés en la formación de los elementos, adivinaron la existencia de un estado inicial de muy alta densidad y temperatura que habría explosionado en un momento dado. Curiosamente, Gamow atribuyó en su autobiografía esta idea al propio Fridman, aunque en ninguno de los trabajos de este se mencionan las posibles propiedades físicas del estado inicial del universo. Bien es cierto que esas características iniciales podrían haber sido consideradas como obvias en las discusiones de Fridman con sus estudiantes de la Universidad de Leningrado, pero no hay ningún documento que permita suponer que así fue.

LOS AÑOS SILENCIOSOS

Cuando se revisa la historia de los acontecimientos científicos que llevaron a la formulación de la teoría del Big Bang, como hemos hecho aquí, resulta evidente de inmediato un hecho curioso que es interesante analizar brevemente: ¿por qué hubo un lapso temporal tan grande entre el momento en que Hubble formuló su ley y el descubrimiento del fondo de radiación cósmica de microondas por parte de Penzias y Wilson? Treinta y seis

años suenan a muchos, quizá demasiados. Weinberg también se pregunta sobre este hecho en su libro *Los tres primeros minutos del universo*: ¿por qué un hecho tan relevante como ese último, uno de los más importantes descubrimientos científicos de la historia de la ciencia, ocurrió por accidente? Y, sobre todo, ¿por qué nadie buscó ese fondo de radiación a partir de 1948, una vez que Gamow, Alpher y Herman hicieron públicos sus resultados, o más tarde, en 1953, tras haber llevado a cabo los dos últimos un cálculo mucho más refinado junto con el astrofísico estadounidense James W. Follin, Jr.? Los trabajos de estos investigadores habían pasado desapercibidos entre los astrofísicos y cosmólogos, pero ¿por qué nadie más entre ellos siguió la línea de razonamiento de Gamow y colaboradores? En realidad no fue hasta 1964 cuando Hoyle, Peebles y los físicos Yákov B. Zeldóvich (1914-1987), soviético, y Roger J. Tayler (1929-1997), británico, todos ellos de manera independiente, retomaron los cálculos de nucleosíntesis en un modelo tipo Big Bang con un estado inicial muy caliente y denso.

Tal y como Gamow relató a Peebles en 1967, ni él ni sus estudiantes dieron en un principio suficiente importancia a sus estimaciones de la temperatura y no pensaron en posibles experimentos para confirmarla. Al parecer, Alpher y Herman sí que consultaron con varios grupos de investigación que contaban con expertos en medida de radiación, pero con la tecnología entonces disponible no era posible detectar una radiación con una temperatura inferior a unos 10 K. Por otra parte, a finales de la década de 1940 y principios de la siguiente, los astrofísicos y los cosmólogos tenían muchas reticencias sobre cualesquiera teorías que trataran de las características físicas del principio del universo: las altas temperaturas, presiones y densidades que se suponía debían haber existido en el universo primitivo constituyan un escenario en el que la aplicación de las leyes de la mecánica estadística, la mecánica cuántica y la física nuclear era, cuando menos, de dudosa fiabilidad.

Pero puede que el impedimento mayor estuviera ligado al propio meollo de la teoría, a saber, la formación de los elementos. A pesar de que, en un principio, los resultados de Gamow, Alpher

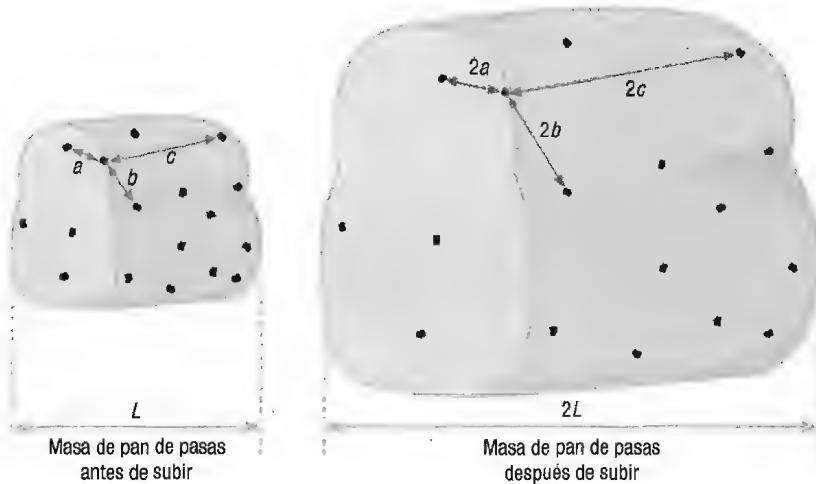
y Herman daban cuenta de la abundancia relativa de los elementos, que se habrían formado en el Big Bang, se encontró pronto con una dificultad insuperable: la síntesis de los núcleos más pesados mediante el mecanismo de adición sucesiva de neutrones no era viable ya que la cadena ascendente en el número de nucleones se rompería al llegar a los sistemas con 5 u 8 protones y/o neutrones, algunos de los cuales no existen como núcleos estables. Enseguida se descubrió que esos saltos podían obviarse en otro contexto: los núcleos de las estrellas y en las explosiones supernova donde la abundante presencia de helio (He) podría dar lugar a colisiones de hasta tres núcleos de ^4He para formar un núcleo de carbono-12 (^{12}C) y salvar así la dificultad. En 1957 apareció el ya citado artículo de los Burbridge, Fowler y Hoyle donde demostraron este extremo, estableciendo los procesos que darían lugar a la formación de los elementos más pesados. A día de hoy se cree que el Big Bang habría sido responsable de la formación del hidrógeno, el helio y, quizás, algunos otros elementos ligeros, estos últimos en parte. Las estrellas y las supernovas serían los lugares en los que se habrían sintetizado el resto de elementos.

EL MODELO CORRIENTE

El hecho de que la teoría del estado estacionario acabara siendo desechada en favor de la del Big Bang no fue debido a nada más (y nada menos) que a lo que en la ciencia, en general, y en la física, en particular, resulta su base más fundamental: los resultados experimentales. En cualquier caso, debemos decir que está fuera del ámbito del modelo del Big Bang establecer los eventos que dieron lugar a que ocurriese. Algunas teorías al respecto resultan demasiado especulativas y, sobre todo, no han permitido hasta la fecha establecer predicciones que pudieran ser comprobables mediante experimentos.

Lo que hoy día se conoce como el «modelo corriente» del universo establece que este surgió de lo que podríamos denominar como una «explosión» que acaeció en todo el espacio disponi-

FIG. 3



Una manera de entender el proceso de la expansión del universo desde el Big Bang y qué implica para las galaxias es imaginarnos al universo como un pan de pasas durante la fase del proceso de elaboración en la cual la masa de pan aumenta de volumen o «suoe». Si el pan duplica sus dimensiones en las tres direcciones (largo, ancho y alto), las distancias entre las pasas (las galaxias) que inicialmente eran a , b , c se habrán duplicado, siendo ahora $2a$, $2b$ y $2c$, respectivamente.

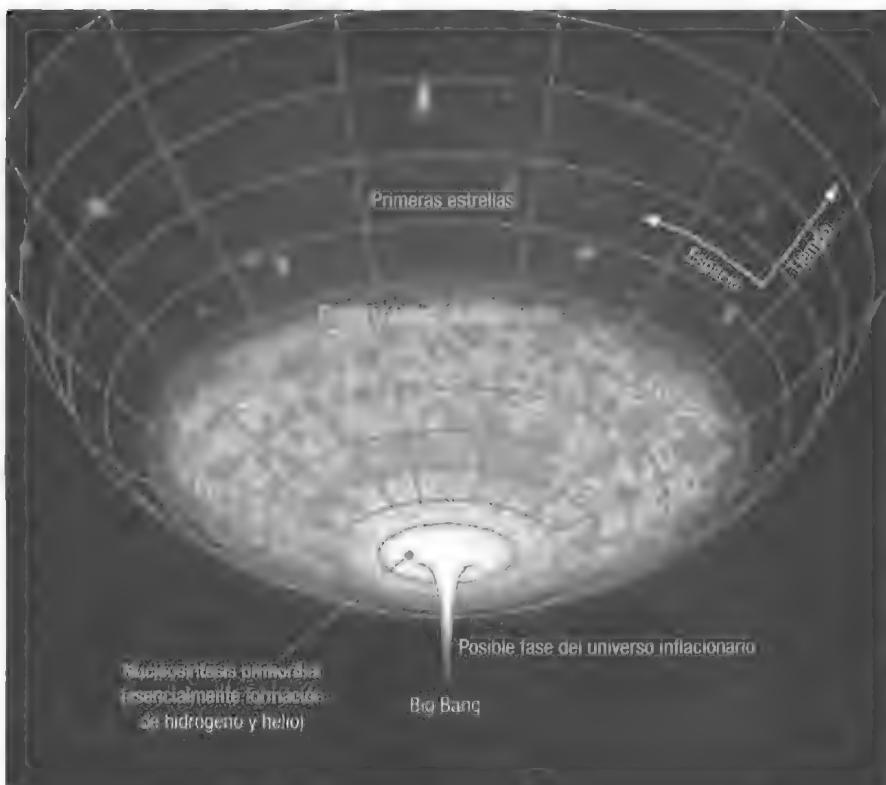
ble de forma simultánea y que provocó que todas las partículas existentes comenzaran a alejarse unas de otras. No se trató pues de una explosión como las que conocemos en la que el estallido se produce a partir de un punto concreto. Una analogía del proceso la podemos hacer con un pan de pasas (figura 3). Al elaborarlo, la levadura hace que la masa se expanda. Las pasas representarían las galaxias que retrocederían unas respecto de otras a medida que la masa de pan fuera creciendo. En realidad, las pasas (las galaxias) no están en movimiento, pero se alejan unas de otras por efecto de la expansión de la masa de pan (la expansión del espacio cósmico).

Apenas una centésima de segundo más tarde de producirse el Big Bang (figura 4), la temperatura estimada era de unos 10^{11} K, muy por encima de la que existe en el interior de las estrellas.

A esa temperatura no existían ni los átomos ni los núcleos atómicos y el universo estaba poblado por electrones y *neutrinos*, por sus antipartículas (partículas con la misma masa y espín que la partícula dada, pero con carga opuesta) respectivas, *positrones* y *antineutrinos*, y por *fotones*. Los electrones y los positrones se podían formar a partir de la energía disponible por los otros tres tipos de partículas, aniquilándose inmediatamente después de haber sido creados y produciendo radiación en esa aniquilación. Se había establecido de esta manera un estado de equilibrio térmico que puede describirse mediante la mecánica estadística. Otro punto importante es que ese estado no dependía de lo que pudiera haber ocurrido con antelación. La densidad de este sistema de partículas elementales era del orden de $4 \cdot 10^9$ veces la del agua. Con estas densidades, también los neutrinos y los antineutrinos (que a duras penas interactúan con la materia en las condiciones que hoy conocemos) se encontrarían en equilibrio con los fotones, los electrones y los positrones, produciéndose colisiones frecuentes entre todos ellos. Por su parte, los protones y los neutrones escaseaban: menos de 1 por cada 10^9 fotones, electrones o neutrinos. En tales circunstancias, los protones interactuarían con estas partículas transformándose en neutrones y viceversa. El tiempo de expansión característico (que viene dado por el inverso de la constante de Hubble en cada momento) era de unas 2 centésimas de segundo.

La explosión inicial había provocado el inicio de la expansión del universo cuya temperatura iría disminuyendo progresivamente. Al cabo de una décima de segundo sería de unos $3 \cdot 10^{10}$ K y 10^{10} K al cabo de un segundo. Los tiempos de expansión característicos habrían aumentado siendo de 0,2 s y 2 s. Transcurrida la primera décima de segundo no se habían producido grandes cambios: las partículas ligeras continuaban estando en equilibrio térmico, seguían sin existir los núcleos y las transformaciones entre protones y neutrones se habían decantado ligeramente de manera que ahora abundaban más aquellos (65%) que estos (35%). Al cabo de un segundo, el descenso de temperatura provocó que los neutrinos y los antineutrinos salieran del equilibrio térmico y empezaran a comportarse como las elusivas partículas

FIG. 4



Big Bang y algunos acontecimientos fundamentales en la evolución posterior del universo. Tras el Big Bang, el universo comenzó a expandirse. Es posible que durante un corto periodo inicial lo hiciera de manera extremadamente rápida, en lo que se denomina *fase inflacionaria*. La temperatura era elevadísima pero comenzó a descender. Llegó un momento en que las condiciones permitieron la creación de núcleos atómicos y entonces tuvo lugar la nucleosíntesis primordial (esencialmente formación de hidrógeno y helio). Pocos cientos de miles de años tras el Big Bang, se comenzó a emitir la radiación que hoy detectamos como radiación del fondo cósmico de microondas. El universo empezó a parecerse al actual cuando se formaron las primeras estrellas y galaxias.

que conocemos hoy día, dejando de interaccionar con el resto de partículas presentes. La densidad habría descendido a un valor del orden de $4 \cdot 10^5$ veces la del agua, y los electrones y los po-

sitrones empezaron a aniquilarse con una velocidad mayor que con la que se producían a partir de la radiación; los protones habrían aumentado (75%) a costa de los neutrones que serían menos que antes (25%).

Pasados unos 10 segundos, la temperatura era de $3 \cdot 10^9$ K y la energía disponible para la creación de electrones y positrones ya no bastaba para contrarrestar su aniquilación: la energía neta liberada en el balance de ambos procesos dio lugar a una ralentización de la expansión del universo. Aparecieron los primeros sistemas nucleares ligeros como ^2H (deuterio, un isótopo del hidrógeno), ^3H (tritio, otro isótopo del hidrógeno), ^3He (helio-3) y ^4He (helio-4), todos salvo el primero en proporciones muy pequeñas. Los núcleos de deuterio, débilmente ligados, se desintegran apenas formados por lo que la formación de los otros tres, que requiere que el ^2H colisione y absorba un protón o un neutrón, estaba muy penalizada. En ese momento había un 80% de protones y un 20% de neutrones.

La temperatura continuó descendiendo llegando hasta los 10^9 K cumplidos los tres minutos desde el Big Bang. El universo estaba formado fundamentalmente por fotones, neutrinos y antineutrinos ya que los electrones y los positrones se habían aniquilado en su mayoría. Protones y neutrones estaban presentes en una proporción del 85% al 15% y los núcleos ligeros antes mencionados empezaron a sintetizarse en mayor proporción, aunque la aún demasiado rápida desintegración de los núcleos de deuterio mantenía un «cuello de botella» en la cadena de creación de núcleos más pesados. En cuanto la temperatura descendió algo más, los núcleos de ^2H se podían mantener ligados durante más tiempo y los procesos de síntesis de los núcleos más pesados empezaron a ser mucho más eficientes.

Después de una media hora, la temperatura había descendido hasta unos $3 \cdot 10^8$ K. En este momento, el universo contenía fotones, neutrinos, antineutrinos y una pequeña cantidad de electrones (que se debían fundamentalmente a la desintegración de neutrones en protones, proceso mucho más probable que el contrario). Además, por cada electrón había un protón que se encontraba formando parte de núcleos de hidrógeno



La galaxia EGS-zs8-1, ubicada en el punto del firmamento señalado por la flecha, y ampliada en el recuadro superior, fue una de las primeras que se formaron en el universo. Según las conclusiones de un estudio realizado por el equipo internacional de Pascal Oesch, de la Universidad Yale en Estados Unidos, esta galaxia situada en los confines del universo visible completó su proceso básico de formación unos 670 millones de años después del Big Bang.

(en un 70%) o de helio (en un 30%). El universo continuó con su expansión y su enfriamiento, disminuyendo su densidad, hasta que al cabo de unos cuantos cientos de miles de años la temperatura fue lo suficientemente baja para que los electrones restantes (pocos) pudieran formar con los núcleos (también pocos) los primeros átomos de hidrógeno y helio. Fue en ese momento cuando la gravitación empezó a desempeñar su papel: actuando sobre el gas resultante de la formación de los átomos, produjo reagrupamientos de materia que dieron lugar a la aparición de las galaxias y las estrellas (véase la imagen de la página anterior).

Como dijimos antes, en este modelo corriente no se abordan preguntas tales como: ¿qué ocurrió exactamente durante la primera centésima de segundo? o ¿por qué la proporción entre las partículas nucleares y los fotones era inicialmente de 1 a 10^9 ? Se supone que las respuestas a ese tipo de preguntas corresponden a las condiciones iniciales del proceso físico que se intenta describir. Pero existen algunos problemas que han sobrevenido con los datos experimentales obtenidos por los nuevos telescopios espaciales. El satélite WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) ha podido determinar que el universo es casi plano, lo que contradice el modelo cosmológico del Big Bang que establece una curvatura creciente con el tiempo. Por otro lado, las distancias observadas entre las regiones más distantes del universo a ambos lados del cielo son tan grandes que la luz emitida por una de ellas no habría podido alcanzar a las otras en un tiempo del orden de la edad del universo si se asume la teoría del Big Bang. Sin embargo, la uniformidad de la temperatura de la radiación del fondo cósmico de microondas indica que esas regiones debieron estar en contacto en el pasado remoto. Por último, la teoría del Big Bang predice la existencia de un gran número de monopolos magnéticos (hipotéticos tipos de partícula con un solo polo magnético, norte o sur) estables que, en cambio, nunca se han observado. Para resolver estos problemas, algunos cosmólogos propusieron alrededor de 1980 la *teoría del universo inflacionario*, una variante de la del Big Bang cuya particularidad esencial es la existencia, justo antes del periodo de expan-

sión gradual que hemos descrito antes, de un periodo de expansión exponencial extremadamente rápida. También el papel que puedan desempeñar la energía y la materia oscuras, ingredientes fundamentales del propio proceso de expansión del universo y de su composición, y las implicaciones que sobre la teoría del Big Bang puedan tener, son aspectos de gran interés para el próximo futuro en cosmología.

LECTURAS RECOMENDADAS

BATTANER, E., *Física de las noches estrelladas: astrofísica, relatividad y cosmología*, Barcelona, Tusquets, 2011.

—: *Kepler. El movimiento planetario*, Barcelona, RBA, 2012.

BLANCO, D., *Einstein. La teoría de la relatividad*, Barcelona, RBA, 2012.

CORCHO, R., *Galileo. El método científico*, Barcelona, RBA, 2012.

DURÁN, A.J., *Newton. La ley de la gravedad*, Barcelona, RBA, 2012.

HAWKING, S., *Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros*, Barcelona, Editorial Crítica, 1990.

—: *El universo en una cáscara de nuez*, Barcelona, Editorial Crítica, 2002.

HAWKING, S., MLODINOW, L., *El gran diseño*, Barcelona, Editorial Crítica, 2010.

HOGAN, C.J., *El libro del Big Bang. Introducción a la cosmología*, Madrid, Alianza Editorial, 2005.

HUERTAS, J.L., *Copérnico. El heliocentrismo*, Barcelona, RBA, 2012.

KRAGH, H., *Historia de la cosmología. De los mitos al universo inflacionario*, Barcelona, Editorial Crítica, 2008.

LALLENA, A.M., *Gamow. El Big Bang*, Barcelona, RBA, 2014.

MADRID, C.M., *Laplace. La mecánica celeste*, Barcelona, RBA, 2012.

WEINBERG, S., *Los tres primeros minutos del universo*, Madrid, Alianza Editorial, 1980.

ÍNDICE

Agustín, san 16, 20, 31

Alpher, Ralph A. 9, 107, 108, 112-116, 118, 120, 126, 127

Andrómeda 11, 39, 40, 60, 61, 77-79, 82

átomo primigenio 67-74, 93, 102, 103, 126

Bethe, Hans A. 107-111

Big Bang 8, 12, 49, 67, 75, 90, 104, 105, 118, 119, 121-129, 131-135

Bondi, Hermann 121, 124

candela estándar 85, 88

cefeidas 83-89

constante cosmológica 44, 45, 69, 71

Copérnico, Nicolás 22, 24, 25, 28

creación entrópica 70

De Sitter, Willem 9, 45, 53, 55, 64, 66, 67, 70-72, 90, 94

densidad de radiación 116

desplazamiento al rojo 58-61, 66, 81, 89, 90, 92, 94, 125, 126

Dicke, Robert H. 98, 99, 118

Doppler, Christian 58, 59

Eddington, Arthur 46, 47, 64, 66-68, 70-73, 92, 93

Einstein, Albert 9, 16, 40, 44, 45, 47, 51, 52, 54, 65, 66, 69-71, 73, 108, 109

espectro 38, 39, 58, 59, 61, 80, 81, 83, 97, 99, 100, 108, 117

espectroscopio 39

fondo de radiación cósmica de microondas 8, 95, 99, 100, 102, 104, 118, 126, 127, 131, 134

Fowler, William A. 118, 123, 124, 128

Fridman, Alexander 9, 52-55, 64, 65, 67, 69, 70, 93, 109, 110, 126

galaxia 8-11, 33, 35, 36, 38, 53, 55, 58, 60-63, 66, 67, 77-81, 85, 87, 89-91, 94, 96, 116, 125, 129, 131, 133, 134

Galileo 22, 24, 25, 28

Gamow, George A. 9, 54, 73, 107-116, 118, 120-122, 126, 127

Gold, Thomas 121

gravedad 17, 25, 28, 44, 45, 56, 57, 111, 122

Hale, George 39, 40, 82

Harrison, Edward R. 32, 124, 125

Hawking, Stephen 15

Herman, Robert 108, 115, 116, 118, 120, 126-128

Herschel, Frederick William 36, 38

Hoyle, Fred 118, 121-124, 127, 128

Hubble, Edwin P. 8, 9, 65, 73, 78, 79, 82, 84, 88-94, 126
constante de 89, 130
tiempo de 69

Huggins, William 39, 58

Kant, Immanuel 28, 30, 31, 33, 35

Kelvin, lord (William Thomson) 32, 124

Kepler, Johannes 24-29, 32, 45, 100

Laplace, Pierre-Simon 34, 35

Lemaître, Georges 9, 64-74, 90-93, 102-104, 110, 114, 120, 126

nebulosa 33-36, 38-41, 58, 61, 62, 64-66, 77, 79, 82, 84, 88, 89-94

Newton, Isaac 16, 22, 25, 28, 29, 35, 44, 45

observatorio
de Harvard 83
de Monte Wilson 40, 82, 84, 94, 100
Lowell 60, 61
Yerkes 82

paradoja de Olbers 31, 124, 125

paralaje 36, 37, 42, 43, 85, 88

Peebles, Philip J.E. 96, 98, 99, 104, 125, 127

Penrose, Roger 16

Penzias, Arno A. 8, 9, 94-96, 98, 99, 102, 104, 118, 126

principio cosmológico 10, 120

Ptolomeo, Claudio 20-22, 24, 80

rayos cósmicos 102-104

Slipher, Vesto 58, 60-62, 65, 89

telescopio
espacial (satélite astronómico) 41, 43, 60, 80, 91, 99, 101, 134
terrestre 34, 36, 38-40, 42, 80, 83, 84

teoría de la relatividad 16, 40, 44, 45, 47, 49, 51, 52, 54, 64, 65, 72, 98, 109, 110, 115, 125

universo
en expansión 8, 52, 54, 55, 64, 66-73, 89, 90, 93, 94, 98, 103, 110-112, 114-116, 121, 122, 124-126, 128-132, 134, 135

estático/estacionario/sin
inicio ni fin/inmutable 8,
16, 28, 31, 44, 52, 54, 55, 65-
69, 71, 120

inflacionario 131, 134
isla 33, 35, 36, 61, 77

Vía Láctea 11, 34-36, 61, 77-79,
86-88, 94, 96, 100

Weinberg, Steven 53, 55, 127
Wilson, Robert W. 8, 9, 94-96, 98,
99, 104, 118, 126

ylem 114, 115

El Big Bang y el origen del universo

Hoy día se acepta comúnmente que el universo, tal como lo conocemos, surgió hace unos 13 800 millones de años a partir de un evento explosivo que se ha dado en llamar «Big Bang». Tras él, un sistema con dimensiones extremadamente pequeñas y una densidad y temperatura extraordinariamente elevadas inició una expansión que aún perdura. La teoría del Big Bang intenta describir lo que aconteció a partir de ese instante inicial. Pero ¿cómo surgió esa teoría? ¿Cuáles fueron las preguntas que llevaron a Lemaître, por un lado, y a Gamow, Alpher y Herman, por otro, a formularla? ¿Qué hechos experimentales la confirman?

Antonio M. Lallena es catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Granada.